

З. ПАУЛИН

ЧУДЕСА ЗВУКА



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

Выпуск 579

З. ПАУЛИН

ЧУДЕСА ЗВУКА

Сокращенный и переработанный перевод
с чешского М. Р. ЖОЛОБОВОЙ



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЭНЕРГИЯ»

МОСКВА 1965 ЛЕНИНГРАД

УДК 534.86
П21

Рассматриваются процессы возникновения и распространения звуковых волн. Приведены основные сведения по электроакустике, усилению звука, корректировке частотных характеристик усилителей, а также принципы работы различных микрофонов, звукоснимателей, громкоговорителей и магнитных головок.

Брошюра предназначена для широкого круга радиолюбителей, интересующихся воспроизведением звука.

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Книга чешского инженера З. Паулина в популярной форме знакомит читателя с возникновением звуковых волн, преобразованием звуковой энергии в электрическую и воспроизведением звука в любительских условиях.

Автор описывает различные системы микрофонов и громкоговорителей, расстановку их при монофоническом и стереофоническом воспроизведении звука, рассказывает об усилителях и способах коррекции их частотных характеристик. Все это может быть интересно для широкого круга советских радиолюбителей.

При подготовке перевода к изданию книга была частично переработана, а некоторые ее части, не представляющие интереса для наших читателей, сокращены или вовсе исключены. В схемах нами изменены обозначения номиналов элементов (конденсаторов, резисторов) согласно действующим отечественным стандартам.

Редакция Массовой радиобиблиотеки

СОДЕРЖАНИЕ

НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ О ПЕРЕМЕННЫХ ВЕЛИЧИНАХ

Приведем здесь некоторые важнейшие определения из теории переменных величин, несмотря на то, что часть из них, несомненно, знакома большинству читателей.

Величина (давление, скорость, напряжение и т. п.), значение которой меняется с течением времени, называется переменной величиной. Для характеристики переменной величины необходимо знать закон, по которому она меняется во времени. Этот закон можно задать либо аналитически в виде математической формулы, либо графически. В последнем случае берут две взаимно перпендикулярные прямые линии, называемые осями координат, и откладывают в масштабе на горизонтальной оси значения времени t, а на вертикальной — мгновенные значения переменной величины. Если затем на рисунке нанести точки, соответствующие значениям величины в данные моменты времени (рис. 1), то получим кривую, по которой можно судить о поведении переменной величины.

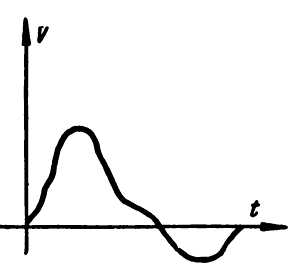


Рис. 1. Графическое изображение переменной величины.

Характер изменения величины во времени может быть самым разнообразным, однако в дальнейшем нам придется иметь дело с такими изменениями величины, при которых ее значения повторяются точно или приближенно через равные промежутки времени T. Такие изменения величины носят названия колебаний, а промежуток времени T — периода колебаний. За время T совершается одно полное колебание. Число колебаний, совершаемых за единицу времени, называют частотой колебаний и обозначают буквой f:

$$f = \frac{1}{T}.$$

За единицу частоты принимается одно колебание в секунду; эту единицу называют герц (*гц*).

Простейший тип колебаний представляет собой гармоническое (синусоидальное) колебание, которое записывается в виде

$$y = A \sin (\omega t + \varphi_0),$$

Величина A, равная максимальному значению переменной величины y, называется амплитудой колебания. Выражение $(\omega t+\varphi_0)$ определяет значение y в момент времени t и называется фазой колебания. В момент времени $t=0$ фаза колебания равна начальной фазе φ_0. Величина ω называется циклической или круговой частотой

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}.$$

Откуда произошло это название можно понять, если представить гармоническое колебание графически с помощью вращающего-

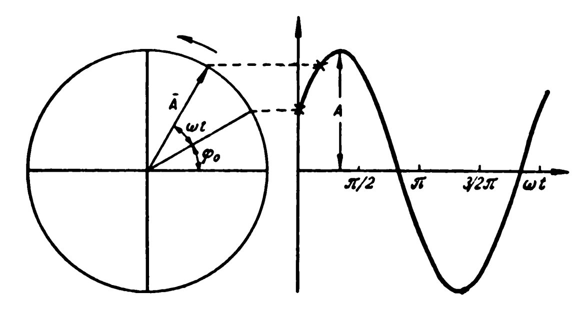


Рис. 2. Изображение гармонического колебания при помощи вращающегося вектора.

ся вектора (рис. 2). Вектор $\bar{A}$, численно равный амплитуде колебания, равномерно вращается против часовой стрелки вокруг точки 0 с угловой скоростью ω. Если в момент времени $t=0$ угол между вектором и горизонтальной осью равен φ_0, то проекция вектора на вертикальную ось изменяется по закону

$$y=A \sin (\omega t+\varphi_0),$$

т. е. совершает гармонические колебания.

ЗВУКОВЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Механические колебания частиц окружающей среды в диапазоне частот от 16 до 20 000 *гц*, воздействуя на орган слуха человека, вызывают ощущение звука. Такие колебания называют звуковыми колебаниями или просто звуком.

Очень часто под этим термином подразумевают вообще любые механические колебания среды. В этом случае диапазон частот от 16 до 20 000 *гц* называют диапазоном частот слышимого звука. Звуки частот, лежащих ниже этого диапазона, называют инфразвуком, а выше — ультразвуком.

Источником звука в среде может быть любой физический процесс, который вызывает колебания частиц среды. Чаще всего для этой цели используют колебания твердых тел (например, колебания мембраны в обычном телефоне, колебание диффузора в громкоговорителе и т. п.).

ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ

Все частицы среды взаимосвязаны друг с другом. Это значит, что колебания одной из них неизбежно должны вызвать колебания соседней с ней частицы, которая в свою очередь вызывает колебания следующей и т. д. Такой процесс передачи (распространения) колебательного движения в среде от одной частицы к другой называют волной, а направление, в котором передаются колебания,—направлением распространения волны (бегущей волны). В случае, если волна распространяется равномерно во все стороны, ее называют *сферической*, если же только в одну сторону— *плоской*.

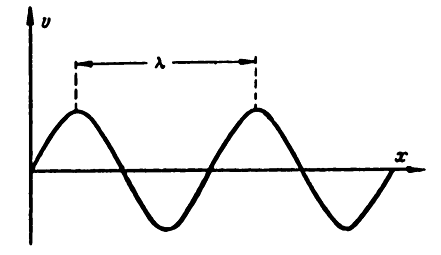


Рис. 3. Зависимость колебательной скорости частиц от расстояния.

Колебательное движение передается от одной частицы к другой не мгновенно, а с некоторым запаздыванием; другими словами, волна в среде распространяется с некоторой конечной скоростью, которую называют скоростью распространения звука и обозначают обычно латинской буквой c. Расстояние, которое пробегает волна за промежуток времени T, равный периоду колебаний, носит название длины волны и обозначается греческой буквой λ. По определению

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}.$$

Если скорость движения частиц среды изменяется по гармоническому закону $v = A \sin \omega t$ (начальную фазу колебания для простоты положим равной 0) и от этой частицы распространяется плоская волна, то другая частица, расположенная на расстоянии x от первой, будет также совершать гармонические колебания, но с запаздыванием по времени на величину $\tau = x/c$. Таким образом, скорость колебаний второй частицы будет:

$$v = A \sin \omega (t - \tau) = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c}\right).$$

Это уравнение называют уравнением распространения плоской волны.

Рассмотрим, как изменяется колебательная скорость v частиц в зависимости от расстояния x для произвольно выбранного момента времени t. Для этого на горизонтальной оси координат отложим в масштабе значения x, а на вертикальной — мгновенные значения скорости и построим график зависимости v от x. Из этого графика, приведенного на рис. 3, видно, что скорости колебаний распределены по синусоидальному закону. С течением времени это

распределение перемещается слева направо со скоростью c, что несколько напоминает движение волны на поверхности воды.

Однако между волнами на поверхности воды и звуковыми волнами есть существенное различие: первые распространяются горизонтально вдоль поверхности воды, в то время как колебания частиц происходят вверх—вниз; такие волны называются поперечными. Колебания же частиц в звуковых волнах совершаются вдоль направления распространения; такие волны называются продольными.

Так как скорость колебаний частиц среды меняется от точки к точке, то и расстояние между ними также меняется от точки к точке. Это приводит к появлению в среде областей сгущения и разряжения частиц, т. е. областей повышенного и пониженного давления. Таким образом, колебания частиц среды всегда сопровождаются колебаниями давления в среде.

СЛОЖНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

Гармонические колебания встречаются на практике довольно редко. Гораздо чаще приходится иметь дело с колебаниями, которые носят более сложный характер. Проведение расчетов и даже оценок при таких колебаниях становится трудной задачей, поэтому оказалось удобным, а в некоторых вопросах (например, в оценке правильности передачи музыки и речи) и необходимым представить сложное колебаиие в виде суммы гармонических колебаний, частоты которых кратны частоте сложного колебания f, т. е. равны f, $2f$, $3f$, ... и т. д.

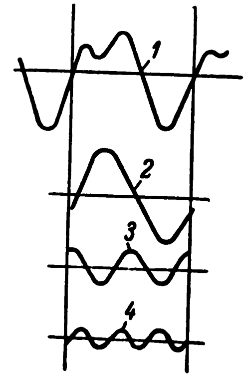


Рис. 4. Разложение сложного колебания на гармоники.

1 — сложное колебание; *2* — основное колебание (первая гармоника); *3* — вторая гармоника; *4* — третья гармоника.

Такие гармонические колебания с частотами f, $2f$, $3f$ и т. д. называются **гармониками** сложного колебания (соответственно первая, вторая, третья и т. д.), а процесс отыскания амплитуд и фаз гармоник — **гармоническим анализом**.

На рис. 4 изображен пример разложения сложного колебания на гармоники. Гармонический анализ сложного колебания может быть выполнен как математически, так и с помощью измерительного прибора, который носит название анализатора гармоник.

БИЕНИЯ

Интересное явление возникает, когда в какую-либо точку пространства приходят две звуковые волны, частоты которых f_1 и f_2 мало отличаются друг от друга. На рис. 5 это явление описано графически. Здесь для простоты принято $A_1=A_2$ и $\varphi_1=\varphi_2$. Результат сложения этих двух волн представляет колебание, амплитуда которого периодически увеличивается и уменьшается, что воспринимается ухом как тон с колеблющейся интенсивностью. Возникновение это-

го явления, называемого **биениями**, объясняется просто: звук усиливается, когда оба колебания совпадают по фазе и, наоборот, ослабляется или совершенно исчезает (как в нашем примере, когда $A_1=A_2$), когда колебания находятся в противофазе. Число усилений и ослаблений за секунду, равное $n=f_2-f_1$, где $f_2>f_1$, называется частотой биений. Чем меньше будет разница между частотами, тем меньше будет частота биений, а в случае, когда $f_1=f_2$, биения совсем исчезнут и будет слышен только один тон. При большом различии между частотами f_1 и f_2 сложное колебание будет восприниматься ухом как два разных тона.

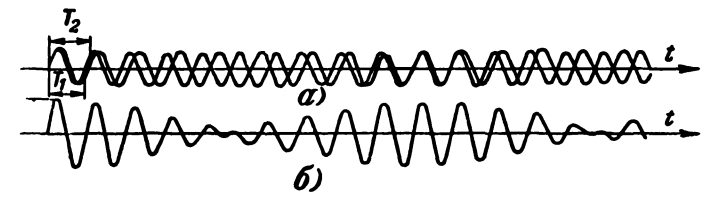


Рис. 5. Возникновение биений.

а — два колебания, близких по частоте; *б* — результирующие колебания (биения).

СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ

Если на пути распространения звуковой волны встречается очень жесткая преграда, то звуковая волна полностью отражается от нее. В результате сложения падающей и отраженной волн образуется сложная волна, называющаяся **стоячей волной**.

Стоячая волна характеризуется тем, что перед преградой образуются области, где звук совсем не слышен; такие области называются **узлами** стоячей волны, и области, где звук слышен громко. Области максимального звучания называются **пучностями** стоячей волны. Расстояние между двумя соседними узлами (или двумя соседними пучностями) составляет половину длины падающей на преграду звуковой волны. Механизм возникновения стоячей волны можно проследить на рис. 6.

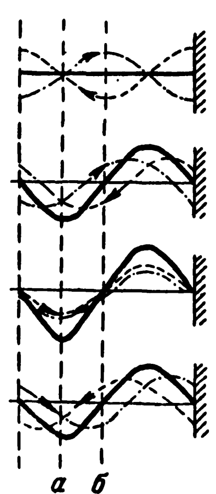


Рис. 6. Возникновение стоячей волны.

а — пучность; *б* — узел волны.

ОТРАЖЕНИЕ И ПРЕЛОМЛЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Если звуковая волна, распространяясь в некоторой среде *1* (рис. 7), достигает границы этой среды с другой средой *2*, то она частично отражается, а частично проходит во вторую среду. Соотношения между направлениями распространения падающей, отраженной и прошедшей (преломлен-

ной) волнами (соответственно между падающим, отраженным и преломленными лучами) такие же, как и для света.

Законы отражения:

а) отраженный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности раздела сред, проведенной в точке падения;

б) угол отражения α'_1 равен углу падения α_1 (рис. 7).

Законы преломления:

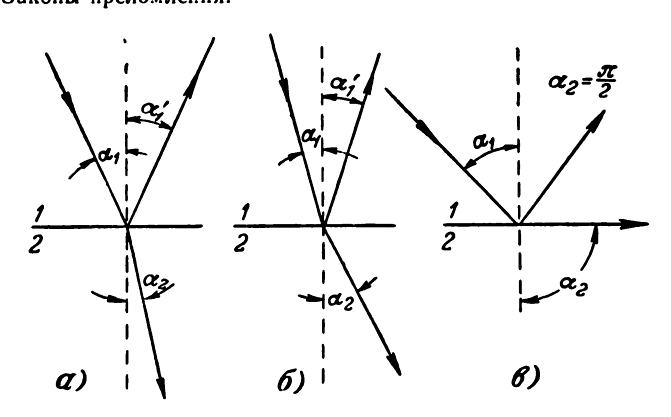


Рис. 7. Преломление и отражение звуковых волн.
а — преломление волны при $c_1>c_2$; *б* — то же при $c_1<c_2$; *в* — полное внутреннее отражение.

а) преломленный луч лежит в одной плоскости с падающим лучом и нормалью к поверхности раздела сред;

б) отношение синуса угла падения к синусу угла преломления равно отношению скоростей звуковых волн в первой и второй средах:

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2}=\frac{c_1}{c_2}=n_{21},$$

где n_{21} — показатель преломления второй среды относительно первой.

Если $c_1>c_2$, то $n_{21}>1$ и угол падения α_1 больше угла преломления α_2 (рис. 7). При $c_1<c_2$, $n_{21}<1$ и угол преломления α_2 больше угла падения α_1. Особый случай возникает при $c_1<c_2$, когда угол падения равен углу $\alpha_{кр}$, определяемому из соотношения

$$\sin\alpha_{кр}=\frac{c_1}{c_2}=n_{21}.$$

Тогда $\alpha_2=90°$ и преломленная звуковая волна отсутствует. Это явление называется полным внутренним отражением (рис. 7,*в*).

РЕВЕРБЕРАЦИЯ

До человека, находящегося в помещении, доходят как прямые звуковые волны непосредственно от источника звука, так и волны, отраженные (один или несколько раз) от стен, потолка и других препятствий.

Если выключить источник звука, то через известный промежуток времени до человека дойдут последние волны от источника и дальнейшее поступление прямых волн прекратится. Однако отраженные волны, совершающие более длинный путь, будут еще в течение некоторого времени продолжать действовать на орган слуха человека. Такое явление «затягивания» звука после выключения его источника носит название р е в е р б е р а ц и и.

Реверберация характеризуется временем реверберации, равным промежутку времени, в течение которого энергия звуковых волн в помещении уменьшится в миллион раз.

Время реверберации представляет собой важную характеристику помещений, предназначенных для художественного восприятия музыки и речи. При слишком большом времени реверберации речь становится неразборчивой, музыка сильно искажается. При малом времени реверберации речь и музыка теряют свою живость и приятный тембр. Поэтому стараются выбирать некоторое оптимальное время реверберации, при котором звук не искажается, но и не теряет свою окраску.

Для большинства залов и прочих помещений оптимальное время реверберации лежит в пределах одной секунды.

ДИФРАКЦИЯ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Если на пути распространения звуковых волн встречается какое-либо препятствие, то звук отразится от него. Однако если размер препятствия невелик по сравнению с длиной волны, то звуковые волны как бы обойдут это препятствие и будут продолжать распространяться дальше в том же направлении. Такое явление отклонения от прямолинейного распространения звуковых волн носит название д и ф р а к ц и и.

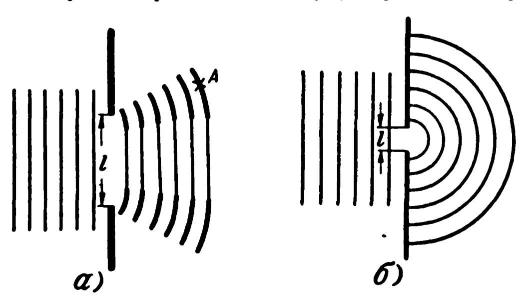


Рис. 8. Дифракция звуковой волны.

а — если отверстие в экране больше длины волны;
б — если отверстие меньше длины звуковой волны.

Дифракцию можно наблюдать не только на небольших препятствиях, но и на больших отверстиях в жестких препятствиях, называемых акустическими экранами. На рис. 8,*а* приведен пример падения плоской звуковой волны на экран с отверстием, размеры которого больше длины волны. Сплошными линиями здесь обозначены так называемые волновые поверхности, характеризуемые тем, что направления распространения волны перпендикулярны к этим поверхностям в каждой точке. Из рисунка видно, что за экраном продолжает распространяться плоская волна, только края ее слегка загнуты из-за дифракции. Совсем другая картина наблюдается в случае, когда размер отверстия мал по сравнению с длиной звуковой волны (рис. 8,*б*). Здесь дифракция сказывается настолько сильно, что за экраном вместо плоской волны образуется сферическая.

ПОГЛОЩЕНИЕ ЗВУКОВЫХ ВОЛН

Как уже было видно в предыдущем параграфе, если звуковая волна падает на преграду, то она частично отражается, а частично проходит через нее. Кроме того, часть энергии звуковой волны может рассеиваться в результате перехода в другие виды энергии, напрнмер в тепло, и т. п. В той области акустики, которая занимается изучением звучания в закрытых помещениях, вся та часть энергии звуковой волны, которая по каким-либо причинам не отразилась от преграды, называется **поглощенной энергией**. Для характеристики преграды вводится понятие коэффициента звукопоглощения, определяемого как отношение поглощенной энергии звуковой волны к энергии падающей звуковой волны:

$$\tau = \frac{W_{\text{погл}}}{W_{\text{пад}}}.$$

Коэффициенты звукопоглощения для некоторых материалов и различных частот приведены в табл. 1

Таблица 1

Материал	Коэффициент звукопоглощения на частоте, *гц*					
	125	250	500	1 000	2 000	4 000
Штукатурка на деревянной основе	0,02	0,02	0,03	0,04	0,04	0,03
Шерстяной материал (640 *г* на 1 $м^2$)	0,04	0,07	0,13	0,22	0,32	0,35
Ковер	0,09	0,07	0,20	0,35	0,43	0,44
Войлок, толщиной 1 *см*	0,10	0,20	0,52	0,71	0,66	0,44

СКОРОСТЬ ЗВУКА

Звук распространяется в среде путем передачи колебаний от одной частицы к другой. Скорость распространения звуковой волны зависит от физических свойств окружающей среды. Для газа скорость распространения равна:

$$c = \sqrt{\frac{\varkappa P_0}{\rho}},$$

где P_0 — давление газа в состоянии покоя;

$\varkappa$ — показатель адиабаты, равный отношению теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме: $\varkappa = c_p/c_v$ (для воздуха $\varkappa = 1{,}4$);

ρ — плотность газа.

Так как отношение P_0/ρ зависит от температуры, то и скорость распространения звука зависит от температуры. Для воздуха эта зависимость приближенно выражается в виде

$$c = 331{,}7 + 0{,}6t \ [м/сек].$$

На практике скорость звука в воздухе при нормальной температуре (20° С) принимают равной 344 *м/сек*. Нужно сказать, что на скорость звука не влияет его частота. Подтверждением этому может служить тот факт, что звуки различных частот приходят к слушателю одновременно. Скорость распространения звука в различных средах приведена в табл. 2.

Таблица 2

Среда	Скорость звука, *м/сек*	Среда	Скорость звука, *м/сек*
Воздух	344	Вода (21,5° С)	1 484
Кислород	317	Глина	5 105
Азот	336	Сталь	5 000
Водород	1 270	Олово	1 300
Метан	432	Дерево	3 320
Углекислый газ	258		
Угарный газ	337		

ЗВУКОВОЕ ДАВЛЕНИЕ

В состоянии покоя в среде наблюдается постоянное атмосферное давление. При распространении звука давление в среде начинает изменяться. Разность между переменным значением давления в среде и атмосферным давлением называют **звуковым давлением**.

Звуковое давление в среде измеряется в ньютонах на метр в квадрате или в микробарах (*мкбар*), $1 н/м^2 = 10$ *мкбар*.

Очень часто для измерения звукового давления пользуются специальной логарифмической единицей — децибел. Звуковое давление

в децибелах определяется как $20 \log \frac{P}{P_0}$, где P — звуковое давление в среде, а $P_0=2\cdot10^{-4}$ *мкбар* — некоторая постоянная, называемая пороговым звуковым давлением.

Амплитуда колебаний звукового давления в случае плоской звуковой волны не зависит от расстояния, которое проходит волна; в случае сферической волны амплитуда колебаний давления обратно пропорциональна расстоянию от источника звука.

Звуковые давления, создаваемые некоторыми источниками звука, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Источник звука и расстояние	*мкбар*
Тихая речь, 1 *м*	0,01
Нормальная речь, 1 *м*	От 0,8 до 1,0
Громкая речь (сценическая), 1 *м*	30
Скрипка (тихо), 1 *м*	0,5
Струнный квартет, 2,5 *м*	До 15
Фортепьяно, 3 *м*	„ 25
Большой оркестр, 10 *м*	„ 150

КОЛЕБАТЕЛЬНАЯ СКОРОСТЬ ЧАСТИЦ

Скорость, с которой колеблются частицы среды около положения равновесия, называется **колебательной скоростью** частиц. В отличие от звукового давления, представляющего собой скалярную величину, колебательная скорость частиц есть векторная величина, т. е. для ее задания необходимо знать не только абсолютное значение скорости, но и направление. Как уже отмечалось выше, направление колебаний частиц среды в звуковых волнах в газах совпадает с направлением распространения волн.

В общем случае, если звуковое давление в среде изменяется по гармоническому закону, т. е.

$$P=P_m \sin \omega t,$$

то и колебательная скорость частиц изменяется по гармоническому закону

$$v=v_m \sin (\omega t+\varphi),$$

где φ — разность фаз между колебательной скоростью частиц и звуковым давлением. Для бегущей волны $\varphi=0$, для стоячей — $\varphi=90°$.

СИЛА ЗВУКА

Количество звуковой энергии, переносимой волной за единицу времени сквозь единицу площади поверхности, перпендикулярной к направлению распространения, называется **интенсивностью** I звуковой волны или **силой** звука.

Для плоской или сферической звуковой гармонической волны

$$I = \frac{1}{2} \frac{P_m^2}{\rho c},$$

где ρ — плотность среды;

c — скорость распространения звука;

P_m — амплитуда колебаний звукового давления.

Так как амплитуда колебаний давления в плоской волне не зависит от расстояния, то и сила звука не зависит от расстояния. В случае сферической волны сила звука обратно пропорциональна квадрату расстояния от источника звука.

ЭЛЕМЕНТЫ ФИЗИОЛОГИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ

Одним из основных вопросов, которым занимается физиологическая акустика, является вопрос о зависимостях между физическими характеристиками звука и его восприятием органом слуха человека.

Знание особенностей восприятия звука ухом имеет большое значение, так как, с одной стороны, эти особенности определяют требования к звукопередающим установкам, помещениям, музыкальным инструментам, а с другой стороны, их изучение дает возможность делать некоторые технические упрощения в аппаратуре, не вредя значительно качественному восприятию звука. Наконец, было бы бесполезной тратой времени и сил создавать передающие и другие акустические устройства, дающие больше, чем способно воспринимать ухо.

Особенно большое значение имеет изучение объемного слушания, т. е. ощущение направления и расстояния.

Произвольное сложное звуковое колебание можно представить в виде суммы ряда гармонических колебаний с некоторыми амплитудами, частотами и фазами.

Совокупность этих гармонических колебаний, в результате сложения которых получается рассматриваемое сложное звуковое колебание, называется спектром последнего; совокупность амплитуд гармонических колебаний называют спектром амплитуд, а совокупность частот — спектром частот.

Каждое гармоническое колебание из спектра сложного музыкального звука называется тоном (простым тоном). Тон характеризуется высотой, которая зависит от частоты: чем больше частота, тем выше тон. Тон, соответствующий наименьшей частоте в спектре сложного музыкального звука, называется основным тоном этого звука. Тоны, соответствующие остальным частотам спектра, называются обертонами. Если частоты обертонов кратны частоте основного тона, то обертоны называются гармоническими (или гармониками).

Звуки с одним и тем же основным тоном могут отличаться тембром. Тембр определяется составом обертонов — их частотами и амплитудами, а также характером нарастания амплитуд в начале звучания и их спадания в конце звучания.

ВЫСОТА ЗВУКА

Высота звука определяется человеком субъективно, на слух, и связывается в основном с частотой звука. Только периодические звуки обладают высотой. Степень точности, с которой человек определяет высоту звука на слух, зависит от остроты, музыкальности и тренировки его слуха (т. е. от абсолютного слуха человека). Следует отметить, что высота звука в какой-то степени зависит от интенсивности звука (при больших уровнях звука): звуки большей интенсивности кажутся ниже, чем слабые.

Ухо человека весьма хорошо различает два близких по высоте тона. Например, в области частот около 2 000 *гц* ухо человека может различать два тона, которые отличаются друг от друга по частоте на 3—6 *гц*. Характерно, что звуки, частоты которых отличаются в одинаковое число раз, воспринимаются ухом, как звуки с одинаковыми различиями по высоте.

ГРОМКОСТЬ

Субъективное суждение о силе воспринимаемого звука принято называть громкостью. Громкость зависит не только от звукового давления (интенсивности звука), но и от частоты.

Из опыта известно, что мы можем услышать звук определенной частоты в том случае, если его звуковое давление превышает некоторую минимальную величину, называемую **порогом слышимости**. Порог слышимости сильно зависит от частоты. На

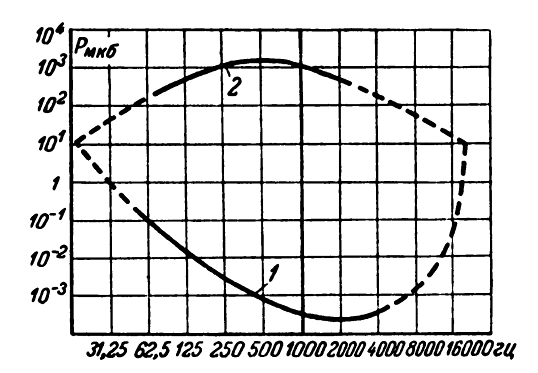


Рис. 9. Пороги слышимости (кривая *1*) и болевого ощущения (кривая *2*).

рис. 9 приведена кривая зависимости порога слышимости от частоты (кривая *1*). Здесь видно, что наилучшая чувствительность человеческого уха к звуковым колебаниям лежит в диапазоне частот 1 000—3 000 *гц*.

При увеличении звукового давления выше порога слышимости можно достигнуть таких значений звукового давления, при которых в ухе возникает ощущение боли (кривая *2* на рис. 9). Это значе-

ние звукового давления называется **порогом болевого ощущения**. Порог слышимости и порог болевого ощущения охватывают так называемую область слышимых звуков.

На рис. 9 видно, что в районе частот около 1 000 *гц* расположен наибольший диапазон слышимости, поэтому тон частоты 1 000 *гц* принят за некий стандарт, по отношению к которому оценивается громкость звука различных частот. Порог слышимости тона частоты 1 000 *гц*, равный $2 \cdot 10^{-5}$ *н/м²*, что соответствует интенсивности звука 10^{-12} *вт/м²*, называют **стандартным порогом слышимости**.

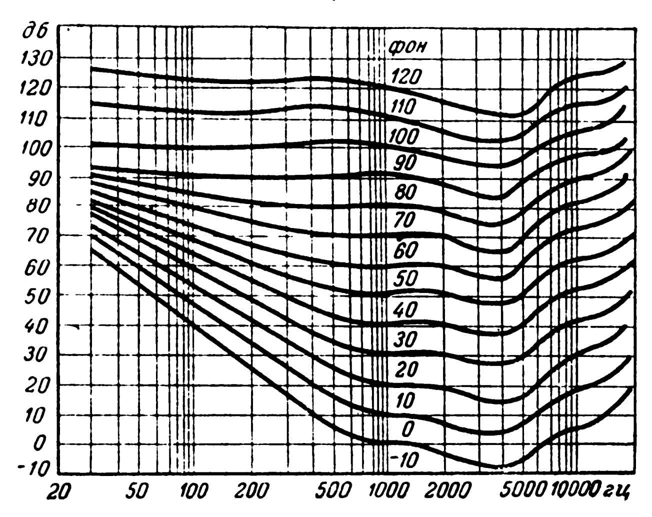


Рис. 10. Кривые равной громкости.

УРОВНИ ГРОМКОСТИ

Из многочисленных экспериментов было обнаружено, что громкость звука растет не пропорционально интенсивности звука или звуковому давлению, а пропорционально логарифму интенсивности звука. В связи с этим оказалось очень удобным выражать интенсивность звука в специальных логарифмических единицах, называемых децибел. Уровень интенсивности звука в децибелах определяется как

$$10 \log \frac{I}{I_0} \; [\partial б],$$

где I — интенсивность звука;

I_0 — стандартный порог слышимости, равный 10^{-12} *вт/м²*.

Оказалось также, что звуки с одинаковыми уровнями интенсивности, но разных частот, создают не одинаковое ощущение громкости. Поэтому для сравнения громкости звуковых колебаний различных частот пользуются логарифмической величиной, которая

называется уровнем громкости звука и выражается следующим образом:

$$H = 10 \log \frac{I^*}{I_0},$$

где I^* — интенсивность звука стандартной частоты 1 000 *гц*, равногромкого с исследуемым звуком. Единица измерения уровня громкости называется фон. Шкалы децибелов и фонов для тона с частотой 1 000 *гц* совпадают друг с другом.

На рис. 10 приведены кривые, называющиеся кривыми равной громкости. Каждая кривая на этом рисунке соответствует некоторому уровню громкости, выраженному в фонах, и дает возможность вычислить уровень интенсивности звуковых колебаний на различных частотах, при которых создается эта громкость, например, уровень громкости в 30 *фон* на частоте 100 *гц* создает звук, уровень интенсивности которого равен 60 *дб*. Из этих кривых можно заметить также, что при одинаковом увеличении интенсивности звука громкость нарастает быстрее на низких частотах и медленнее на высоких.

НАПРАВЛЕННОЕ СЛУШАНИЕ

Очень важная способность человека заключается в возможности определять направление на источник звука. Эта способность связана с тем, что у человека имеется два уха. Она называется **биноуральным эффектом**. Данные экспериментов показывают, что имеются два возможных пути для определения направления, откуда приходит звук: один для высокочастотных тонов, другой — для низкочастотных.

Звук проходит до уха, обращенного к источнику, более короткий по времени путь, чем до второго уха. Вследствие этого давление звуковых волн в ушных каналах различается по фазе и по амплитуде. Амплитудные различия значительны только на высоких частотах, когда длина звуковой волны становится сравнимой с размерами головы. Когда разница в амплитудах превышает пороговую величину, равную 1 *дб*, то кажется, что источник звука находится на той стороне, где амплитуда больше. Угол отклонения источника звука от средней линии (линии симметрии) приблизительно пропорционален логарифму отношения амплитуд.

Для определения направления на источник звука с частотами ниже 1 500—2 000 *гц* существенны фазовые различия. Человеку кажется, что звук приходит с той стороны, с которой уха достигает волна, опережающая по фазе. Угол отклонения звука от средней линии пропорционален разности времен прихода звуковых волн к обоим ушам. Тренированный человек может заметить разность фаз меньше 3°, что составляет разницу во времени 100 *мксек*.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ СЛУШАНИЕ

Человек, сидящий в концертном зале, может по слуху судить о размещении источников звука (музыкальных инструментов оркестра, конферансье и т. п.), их перемещениях и интенсивностях. При

воспроизведении же звука, передаваемого из этого зала, через громкоговоритель такое ощущение пространственного распределения источников звука, или эффект стереофонии, не передается. Этот недостаток пытались примитивно исправить тем, что трансляция осуществлялась двумя или тремя громкоговорителями, расположенными на некоторых расстояниях друг от друга, однако эффект, достигаемый в этом случае, был незначителен.

Современное состояние низкочастотной техники позволяет в сильной степени избавиться от недостатков обычного воспроизведения. Так как проблема стереофонии не только сложна, но и актуальна, то ее техническое решение будет рассмотрено в специальном разделе этой книги.

АКУСТИКА ПОМЕЩЕНИЙ

Помещения, предназначенные для лекций, концертов и других подобных целей, должны отвечать некоторым акустическим требованиям, например речь оратора должна быть понятна во всех точках помещения (аудитории, концертного зала, театра и т. п.). Областью акустики, которая занимается получением хорошей слышимости речи и музыки в закрытых помещениях, является архитектурная акустика.

Акустикой закрытых помещений долгое время занимался физик Сабин. Он установил, что для хорошего восприятия звука в помещении необходимо, чтобы:

1) звук во всех точках зала был достаточно громким. Этому требованию отвечают малые помещения. В больших концертных залах для этого необходимо увеличивать силу звука;

2) качество звучания было одинаковым во всех точках помещения, т. е. акустические свойства помещения не должны зависеть от частоты. Это имеет значение главным образом для сохранения правильной окраски и достоверной передачи звуков. Помещение не должно обладать сильными резонансными свойствами или, наоборот, сильно поглощать звук;

3) звуки, быстро следующие один за другим, были ясными, чистыми и не смешивались. Нельзя допускать слишком длительную реверберацию;

4) помещение, предназначенное для художественного воспроизведения звука, было тщательно изолировано от внешнего шума. Его стены должны быть звуконепроницаемыми, в противном случае воспроизведение будет нарушаться внешними звуками, а внимание слушателей — рассеиваться.

Первое требование в домашних условиях легко выполнимо. Однако не следует сильно увеличивать громкость звука, так как это может вызвать неприятные ощущения. Наиболее трудным в домашних условиях будет выполнение четвертого условия.

Хорошая изоляция помещения от проникания шума извне не только трудная, но и дорогостоящая задача. В этом случае следует руководствоваться местными условиями и возможностями. Также желательны выполнение второго и третьего условий.

СОХРАНЕНИЕ ОКРАСКИ ЗВУКА

Окраска звука (тембр) искажается: во-первых, при излишнем поглощении, а во-вторых — при значительных резонансах помещения. Поглощение звуков более всего зависит от материала стен, потолка, пола и обстановки зала. Надо стремиться, чтобы материал для покрытия зала обладал широкополосностью, т. е. чтобы он поглощал звук на всех частотах равномерно. Необходимо помнить, что изменение поглощения приводит к изменению реверберации. Поэтому надо следить, чтобы улучшение одного условия не привело к ухудшению другого. Другой причиной искажения тембра звука может быть резонанс: резонировать в помещении могут оконные рамы, деревянные тонкие панели, различные части обстановки и т. п.

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Чтобы иметь возможность транслировать, усиливать или записывать звуки, необходимо преобразовать акустические колебания в переменный электрический ток, а затем после достижения определенного усиления снова в акустические колебания. Эту проблему разрешают специальные устройства, называемые электроакустическими преобразователями.

Для преобразования акустических колебаний в соответствующие электрические сигналы служит микрофон, для преобразования электрических сигналов в акустические колебания — громкоговоритель. Из этого следует, что микрофоны присоединяют в начале цепи воспроизведения, а громкоговорители — на ее конце.

Как микрофоны, так и громкоговорители имеют большое значение для качества воспроизведения звука, поэтому необходимо не только их правильное присоединение, но и правильная их эксплуатация.

ХАРАКТЕРИСТИКИ И КЛАССИФИКАЦИЯ МИКРОФОНОВ

Наиболее важный параметр, характеризующий микрофон, — чувствительность, равная отношению напряжения на зажимах микрофона к акустическому давлению падающих на мембрану микрофона звуковых волн. Чувствительность микрофона измеряется в *мв*/(*н*/*м*^{2}) (милливольты на ньютон на метр в квадрате) или в *мв*/*мкбар* (милливольты на микробар).

Чувствительность микрофонов с выходными трасформаторами определяется как отношение напряжения на вторичной обмотке трансформатора к давлению звуковой волны.

Зависимость чувствительности микрофона от частоты называется частотной характеристикой микрофона. В идеальном случае это прямая линия, параллельная горизонтальной оси.

Чувствительность микрофона зависит не только от частоты, но и от угла, под которым на микрофон падают звуковые волны. Отношение чувствительности, которую имеет микрофон при падении на него звуковой волны под некоторым углом φ, к чувствительности, которую имеет микрофон при нормальном падении на него звуковой волны, называется характеристикой направлен-

ности микрофона. Так как характеристика направленности зависит от частоты, то она обычно указывается для диапазона частот (рис. 11) и вычерчивается в виде семейства диаграмм в полярных координатах.

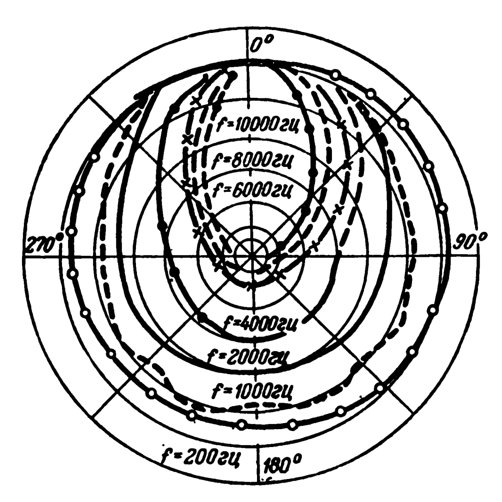


Рис. 11. Характеристика направленности микрофона (в полярных координатах).

Важные характеристики микрофона — его **динамический диапазон** и **полное внутреннее сопротивление**. Динамический диапазон микрофона определяется как отношение наиболее сильного сигнала к наиболее слабому, который только может принять и преобразовать данный микрофон. **Динамический диапазон** выражается обычно в децибелах и достигает у хороших микрофонов 70—80 *дб*.

Полное внутреннее сопротивление микрофона равно отношению напряжения на зажимах микрофона без нагрузки к силе тока, который протекает через микрофон при короткозамкнутых зажимах. Микрофон с малым внутренним сопротивлением работает примерно так же, как источник напряжения, а микрофон с высоким внутренним сопротивлением — как источник тока.

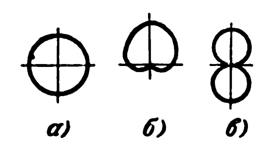


Рис. 12. Характеристики направленности микрофонов.

а — круговая; *б* — кардиоидная; *в*—восьмерочная.

По признаку измеряемой физической величины различают **микрофоны давления** и **микрофоны градиента давления**. Первые имеют одну чувствительную к звуку площадку (мембрану или диафрагму). Микрофоны градиента давления воспринимают звук в двух местах, двумя мембранами, двумя сторонами корпуса и измеряют разность давления в этих двух точках.

Так как звуковое давление величина скалярная, то ее значение перед мембраной микрофона (до тех пор, пока размеры микрофона остаются меньше длины звуковой волны) не зависит от направления распространения звука. Вследствие этого микрофон давления не обладает направленностью, т. е. его характеристика направленности имеет вид окружности (рис. 12,*а*). Наоборот, разность давлений в двух точках зависит от направления распространения звуковых волн и поэтому градиентный микрофон является направленным. Теоретическая характеристика его направленности имеет вид восьмерки, как показано на рис. 12,*в*. Комбинированием микрофона давления с градиентным микрофоном можно получать микрофоны с разнообразными характеристиками направленности, например, с кардиоидной характеристикой направленности (рис. 12,*б*).

По принципу электромеханического преобразования акустических колебаний в электрические, микрофоны делятся на электродинамические, электростатические (конденсаторные), пьезоэлектрические и др.

МИКРОФОНЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ

В этом типе микрофонов используется явление индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле. В зависимости от того, служит ли этот подвижный проводник мембраной или же к мембране прикреплена катушка — эти микрофоны делятся на ленточные и с подвижной катушкой. На рис. 13 приведена схема ленточного микрофона. Очень тонкая, гофрированная металлическая лента, представляющая собой диафрагму, свободно висит между полюсами

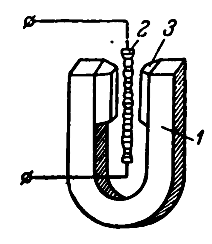


Рис. 13. Схематическое устройство ленточного электродинамического микрофона.

1 — магнит; *2* — лента; *3* — полюсный наконечник.

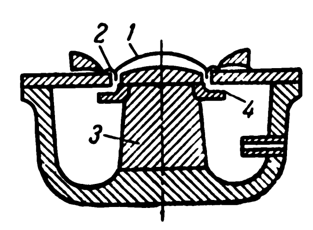


Рис. 14. Схематическое устройство электродинамического микрофона (катушечного).

1 — мембрана; *2* — катушка; *3* — магнит; *4* — зазор.

сильного магнита. Толщину гофрированной ленты выбирают как можно меньше (от 2 до 5 *мк*). Звуковое давление действует на ленту либо с одной стороны (в микрофоне давления), либо с обеих сторон (в микрофоне градиента давления). Хрупкость ленты заставляет защищать ее металлической сеткой и легкой тканью. Средняя чувствительность ленточных микрофонов лежит около 0,1 *мв*/(*н*/*м*²).

Ленточные микрофоны отличаются простотой и хорошей частотной характеристикой (от 40 до 15 000 *гц*), однако размеры его сравнительно велики и форма неудобна. Характеристика направленности его также неравномерна.

Конструкция микрофона с подвижной катушкой приведена на рис. 14. В этом микрофоне мембрана, колеблющаяся под действием звукового давления, несет катушку, расположенную в кольцевом зазоре сильного магнита. В витках катушки при движении ее в зазоре поперек направления магнитного поля возникает электродвижущая сила индукции. Равномерность частотной характеристики микрофона с подвижной катушкой в широком диапазоне звуковых частот (50—10 000 *гц*) достигается тщательным учетом влияния всех элементов конструкции — объемом камеры, зазором, гибкостью, массой и реакций трения.

Микрофон с подвижной катушкой имеет сравнительно небольшие размеры (50—70 *мм*) и до частот 2 000—3 000 *гц* работает как ненаправленный приемник давления. В новейших типах микрофонов этот предел отодвинут еще выше.

Чувствительность микрофона с подвижной катушкой выше, чем чувствительность ленточного микрофона (порядка 1 *мв*/(*н*/*м*²)).

Известны комбинированные микрофоны, где микрофон с подвижной катушкой дополняет ленточный. Переключая оба микрофона, складывая или вычитая снимаемые с них напряжения, можно регулировать характеристику направленности всего комбинированного микрофона.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ (КОНДЕНСАТОРНЫЕ) МИКРОФОНЫ

Электростатический микрофон представляет собой плоский конденсатор (рис. 15), одна обкладка которого подвижная (мембрана), а другая обкладка, представляющая собой корпус, неподвижна. Расстояние между мембраной и корпусом бывает обычно от 20 до 60 *мк*. Мембрана под действием колебаний звуковой волны меняет емкость полученного таким путем конденсатора. В том случае, когда речь идет о микрофоне давления, мембрана должна быть как можно легче, а ее собственная частота намного выше диапазона передаваемых частот, чтобы собственная частота мембраны не влияла на частотную характеристику.

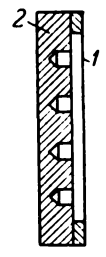


Рис. 15. Схематическое устройство конденсаторного микрофона.

1 — мембрана (подвижная обкладка конденсатора); *2* — корпус (неподвижная обкладка конденсатора).

Схема включения конденсаторного микрофона приведена на рис. 16.

Под действием звукового давления емкость конденсатора периодически изменяется, что вызывает токи заряда и разряда от постоянного поляризующего напряжения, создаваемого батареей *Б*, включенной последовательно с микрофоном. Микрофон включается в одну из схем усиления, чаще всего в схему с катодным повторителем. На практике катодный повторитель обычно монтируется в корпусе самого микрофона для того, чтобы снизить помехи.

Специальная двухмембранная конструкция конденсаторного микрофона (рис. 17) дает возможность, изменяя поляризующее напряжение, плавно менять характеристику направленности. Схема включения такого микрофона приведена на рис. 18,*а*, а изменение характеристик направленности в зависимости от поляризующего напряжения показано на рис. 18,*б*. Неподвижный электрод, имеющий

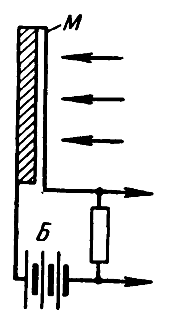


Рис. 16. Схема включения конденсаторного микрофона.

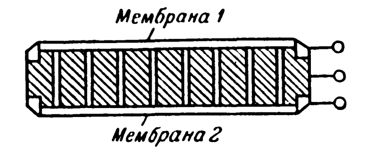


Рис. 17. Конструкция двухмембранного микрофона.

напряжение около 50—60 *в* относительно земли, через конденсатор присоединен к управляющей сетке входной лампы усилителя. Мембрана M_1 соединена с корпусом усилителя, а напряжение на мембране M_2 регулируется при помощи переменного резистора *R*. В случае, если напряжение на мембране M_2 равно напряжению на неподвижном электроде, характеристика направленности представляет собой кардиоиду. Если напряжения на обеих мембранах равны, то их характеристики складываются, в результате чего получается общая характеристика на-

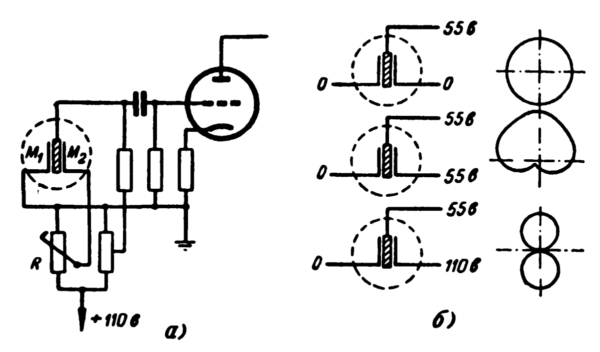


Рис. 18. Схема включения двухмембранного конденсаторного микрофона (*а*) и изменение характеристики направленности от изменения поляризующего напряжения (*б*).

правленности в виде окружности. Наоборот, если напряжение на мембране M_2 превышает в 2 раза напряжение на неподвижном электроде, то получается восьмерочная характеристика.

Из всего этого видно, что конденсаторный микрофон имеет хорошую частотную характеристику и позволяет в широких пределах менять характеристику направленности, благодаря чему его применяют чаще других микрофонов.

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МИКРОФОНЫ

В микрофонах этого типа используется пьезоэлектрический эффект. Это явление заключается в том, что на противоположных гранях пластинки из некоторых (пьезоэлектрических) материалов при деформации или при давлении создается электрическое напряжение, пропорциональное деформации (давлению).

Наиболее распространен, так называемый, пьезоэлектрический микрофон ячейкового типа, чувствительным элементом которого служит работающая на изгиб биморфная кристаллическая ячейка из сегнетовой соли ($KNaC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$) или дифосфата аммония.

Биморфная ячейка состоит из двух тонких пластинок, разделенных общей обкладкой. При изгибе одна из пластинок растягивается, другая — сжимается. Обкладки пластинок включаются так, чтобы получить сложение снимаемых с них напряжений. Чувствительность такой ячейки около 5 *мв*/(*н*/*м*^{2}), а емкость — около 2 000 *пф*. Часто микрофон собирают из двух биморфных ячеек, объединенных по контуру общей рамкой из пластмассы. Такой микрофон воспринимает давление только наружной поверхностью всего элемента.

Другой тип пьезоэлектрических микрофонов — микрофон с диафрагмой. В этом микрофоне две прилежащих стороны прямоугольной пьезоэлектрической пластинки закрепляются, а к свободному углу пластинки прикрепляется диафрагма, движение которой вызывает деформацию пьезоэлектрического кристалла. Чувствительность таких микрофонов выше, чем у микрофонов ячейкового типа, однако их частотная характеристика — хуже.

Таким образом, мы рассмотрели основные типы применяемых микрофонов (угольные микрофоны, как устаревшие, не рассматривались). Понятно, что микрофоны одного и того же типа могут отличаться друг от друга и каждый вид электромеханических преобразователей имеет свои особенности, с которыми следует считаться. Качество микрофонов определяет как частотная характеристика, так и характеристика направленности и чувствительность. Нельзя сконструировать такой микрофон, который бы полностью отвечал всем требованиям, и поэтому выбирается такой тип, который лучше других удовлетворял бы поставленным условиям. Эти условия меняются от случая к случаю; правильный выбор микрофонов зависит от опыта специалиста и от имеющихся возможностей.

Электродинамические и пьезоэлектрические системы микрофонов обычно сравнимы, несмотря на то, что отличаются по некоторым характеристикам. Например, если у электродинамических микрофонов полное выходное сопротивление составляет около 200 *ом*, то у пьезоэлектрических оно достаточно высокое.

Следующее существенное отличие — чувствительность. Чувствительность электродинамических систем около 1 *мв*/(*н*/*м*^{2}), у пьезоэлектрических же систем чувствительность составляет 5—10 *мв*/(*н*/*м*^{2}). Эти два качества достаточно ясно указывают на различные возможности использования этих микрофонов.

Там, где необходима длинная проводка от микрофона к усилителю, надо использовать низкоомные электродинамические микрофоны, а их малую чувствительность следует компенсировать, применяя усилитель с большим усилением. Наоборот, в местах, где микрофон расположен в непосредственной близости от усилителя (до 10 *м*), следует применять пьезоэлектрические микрофоны, так как при их большой чувствительности достаточен усилитель с меньшим усилением. (Если предъявлять большие требования к качеству воспроизведения, то надо выбирать конденсаторные микрофоны.)

РАЗМЕЩЕНИЕ МИКРОФОНОВ

Микрофон представляет собой начальное звено электроакустической цепи. Его значение, а главное его правильное размещение в акустическом поле довольно часто, к сожалению, не принимают во внимание. Неправильное размещение микрофонов может в некоторых случаях так испортить качество воспроизведения, что в дальнейшем его нельзя будет восстановить.

При размещении микрофонов необходимо руководствоваться следующими требованиями:

1. Микрофон не должен быть подвержен воздействию стоячих волн, отраженных звуков и т. п.

2. Полезный сигнал должен быть достаточно сильным, чтобы маскировать мешающие звуки.

3. Если микрофон и громкоговоритель расположены в одном помещении, то необходимо устанавливать их так, чтобы излучаемый громкоговорителем звук не попадал на микрофон. В таком случае может возникнуть акустическая обратная связь и передача станет невозможной. Так как в практике воспроизведения и передачи звука могут возникнуть самые разнообразные случаи, то невозможно дать какое-либо определенное решение по расстановке микрофонов и громкоговорителей. Ниже предлагается ряд примерных вариантов размещения микрофонов.

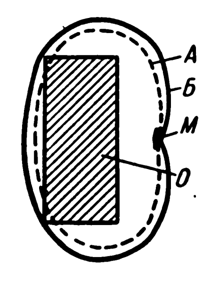


Рис. 19. Применение микрофона с кардиоидной характеристикой для передачи звучания оркестра.

О — оркестр; *М* — микрофон; *А* — характеристика направленности для высоких частот; *Б* — то же для низких частот.

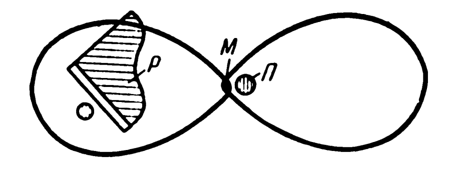


Рис. 20. Расположение микрофона для воспроизведения голоса певца в сопровождении фортепиано.

М — микрофон; *Р* — рояль; *П* — певец.

При записи звучания оркестра большей частью применяют микрофоны с кардиоидной характеристикой направленности (рис. 19).

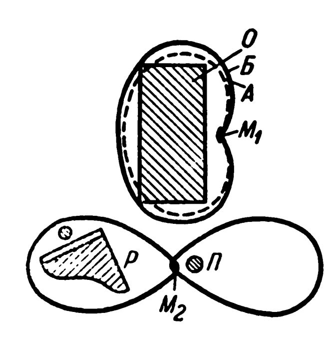


Рис. 21. Расположение микрофонов для воспроизведения оркестра, фортепиано и певца (обозначения те же, что на рис. 19 и 20).

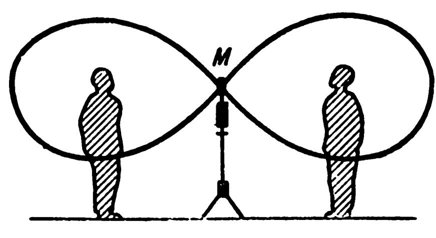


Рис. 22. Использование микрофона с восьмерочной характеристикой для воспроизведения диалога.

М — микрофон.

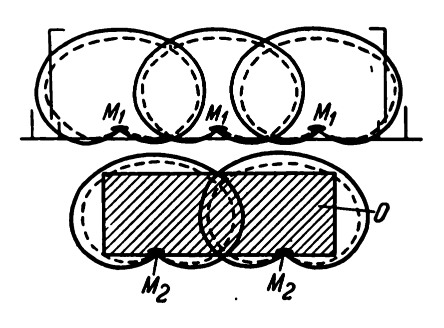


Рис. 24. Расположение микрофонов с кардиоидной характеристикой для передачи пространственного звучания.

M_1 — микрофоны, расположенные на сцене; M_2 — то же в оркестре.

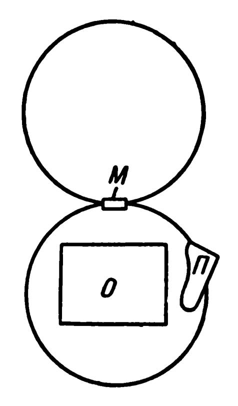


Рис. 23. Применение градиентного микрофона для воспроизведения оркестра и певца.

О — оркестр; *М* — микрофон; *П* — певец.

Характеристика направленности для высоких частот показана кривой *А*, а для низких частот — кривой *Б*. Как видно, все инструменты оркестра охватываются областью действия этого микрофона. Этим сохраняется тембр и характер звучания отдельных музыкальных инструментов, и воспроизведение не искажается. При воспроизведении голоса певца в сопровождении фортепиано можно использовать только один микрофон. Расположение микрофона, певца и фортепиано показано на рис. 20. Правильное взаимное расположение певца, микрофона и фортепиано выбирается в зависимости от типа микрофона. Если же воспроизводятся пение, звуки фортепиано и оркестра, то необходимо применять два микрофона (рис. 21). Для воспроизведения звуков оркестра, чтобы не исказить звучания

инструментов, берут микрофон с кардиоидной характеристикой. Для певца в сопровождении фортепиано выбирается микрофон с восьмерочной характеристикой. Микрофоны с восьмерочной характеристикой используются при записи или воспроизведении диалогов (рис. 22). На рис. 23 показано использование градиентного микрофона для оркестра и певца. Если запись производится в помещении с большой реверберацией, то применяют микрофон с кардиоидной характеристикой, располагая его таким образом, чтобы нечувствительная сторона была обращена к залу.

При воспроизведении оркестра очень трудно добиться передачи пространственного звучания. Здесь обычно нельзя обойтись одним микрофоном. Приемлемое решение приведено на рис. 24. Здесь используются три микрофона для сцены и два для оркестра, все они имеют кардиоидную характеристику. Большое значение имеют режиссерские указания артистам, для того чтобы их передвижение по сцене не выходило, насколько это возможно, из областей действия микрофонов. Оператор по акустике должен установить выходной уровень отдельных микрофонов.

Громкоговорители располагают так, чтобы их звук не падал прямо на микрофон.

КАК ОБРАЩАТЬСЯ С МИКРОФОНОМ

Чтобы микрофон долго сохранял свои качества и позволял правильно и неискаженно передавать звук, необходимо помнить, что он представляет собой весьма хрупкий электроакустический прибор, требующий правильного и внимательного обращения. Обычно ни один из видов микрофонов не выносит грубой тряски и ударов. Поэтому микрофон перед транспортировкой тщательно упаковывают, а при работе устанавливают так, чтобы он не мог быть поврежден. Очень чувствительны к сотрясениям и особенно к продуванию воздухом ленточные микрофоны. Поэтому их ни в коем случае нельзя продувать.

Конденсаторные микрофоны чувствительны не только к сотрясениям, но и к повышению источника питания: при больших напряжениях может возникнуть пробой микрофона, что приведет к его повреждению.

Кристаллические микрофоны боятся влажности, тепла и сотрясений. Допустимые колебания температуры для этих микрофонов могут быть в пределах от —10° до +50° С. Современные кристаллические микрофоны хорошо работают при нормальной влажности. При соблюдении всех этих требований микрофоны хорошо и надежно работают.

Помимо сказанного выше, для хорошей работы микрофона его необходимо подключать к усилителю с соответствующим входным сопротивлением.

ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Громкоговоритель представляет собой заключительное звено электроакустической цепи. Задача громкоговорителя — преобразовать электрические сигналы звуковой частоты в акустические.

Всякий громкоговоритель в принципе состоит из двух частей, объединенных в общей конструкции: электромеханической системы,

преобразующей электрические сигналы в механические колебания диафрагмы, и механикоакустической системы, преобразующей механические колебания диафрагмы в звуковое поле.

По принципу электромеханического преобразования громкоговорители разделяют на электромагнитные, электродинамические, электростатические, пьезоэлектрические и т. п. По оформлению механикоакустической системы различают громкоговорители прямого излучения, в которых диафрагма (диффузор) излучает звук непосредственно в окружающее пространство, и рупорные, в которых диафрагма работает на малый объем — предрупорную камеру — и далее на входное сопротивление экспоненциального рупора. Такая конструкция позволяет получить лучшее согласование акустических свойств диафрагмы и окружающей среды.

Основное требование, предъявляемое к громкоговорителю, заключается в том, что он должен излучать широкий спектр частот при малых искажениях. Для успешной работы как в низко-, так и в высокочастотной областях передаваемого спектра конструктивные элементы громкоговорителя должны удовлетворять различным и во многом противоречивым требованиям. Это повлекло за собой появление и широкое распространение наряду с обычными широкополосными громкоговорителями многополосных (обычно двухполосных) агрегатов, в которых спектр воспроизводимых частот распределяется между отдельными излучателями, каждый из которых обслуживает свой, более узкий диапазон частот.

Для распределения входного электрического сигнала между отдельными излучателями (громкоговорителями) многополосного агрегата обычно применяют специальные электрические разделительные фильтры.

ДИФФУЗОР

Диффузор в громкоговорителе прямого излучения обычно изготовляют из специальных сортов бумаги и изредка из металла или синтетических материалов. Для увеличения жесткости ему придается конусообразная форма. По внешнему краю диффузора выполняется упругий подвес в виде гофрированного кольца.

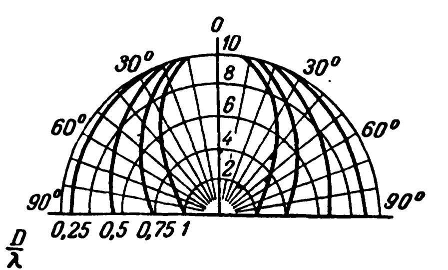


Рис. 25. Характеристики излучения диффузоров для различных отношений D/λ.

Для хорошей работы громкоговорителя, с одной стороны, необходимо, чтобы диффузор был достаточно жестким, чтобы он колебался как единое целое, с другой стороны, масса диффузора должна быть возможно меньшей. Эти требования противоречивы, поэтому при изготовлении диффузора приходится выбирать некоторый компромиссный вариант.

Характер излучения звука диффузором зависит от соотношения диаметра диффузора к длине волны в среде D/λ. На рис. 25 приведены характеристики направленности диффузора для различных

D/λ (0,25; 0,5; 0,75; 1). Из рисунка видно, что при $D/\lambda \leqslant 1$, диффузор ведет себя как точечный источник, т. е. излучает звук равномерно во все стороны. С уменьшением λ (с ростом частоты) излучение звука приобретает все большую и большую направленность и, в случае, когда $D \gg \lambda$, диффузор излучает звук только в одну сторону — в направлении своего движения.

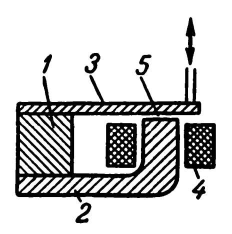


Рис. 26. Схематическое устройство электромагнитного громкоговорителя.

1—магнит; 2 — полюсный наконечник; 3 — якорь; 4 — катушка; 5 — магнитный зазор.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

На рис. 26 приведено схематическое устройство простейшего электромагнитного громкоговорителя. Принцип действия его прост. Переменный ток звуковой частоты, протекающий через катушку, создает переменное магнитное поле в зазоре между якорем и полюсным наконечником. Это переменное магнитное поле вызывает колебания якоря и жестко связанного с ним диффузора.

Несмотря на то, что электромагнитные громкоговорители просты по устройству, дешевы, они в настоящее время почти не применяются, так как обладают малой линейностью (большими нелинейными искажениями), узким диапазоном воспроизводимых частот, очень неравномерной частотной характеристикой.

ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

В современной высококачественной аппаратуре применяются в основном электродинамические громкоговорители. Принцип действия их состоит в следующем.

Если в постоянное магнитное поле поместить проводник с протекающим по нему током, то на него будет действовать сила, перпендикулярная силовым магнитным линиям магнитного поля. Обычная конструкция такого громкоговорителя приведена на рис. 27.

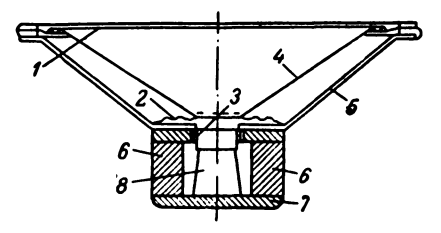


Рис. 27. Конструкция электродинамического громкоговорителя.

1 — гофрированный край диффузора; 2 — центрирующая шайба; 3 — катушка; 4 — диффузор; 5 — диффузородержатель; 6 — магнит; 7—полюсные наконечники; 8—керн.

Магнитное поле создается электромагнитом или постоянным магнитом У громкоговорителей с электромагнитом по катушке подмагничивания (возбуждения) протекает постоянный ток.

В громкоговорителях малой мощности катушка возбуждения используется в качестве дросселя фильтра выпрямителя. У громко-

говорителей большей мощности для питания катушки возбуждения применяется самостоятельный источник тока (выпрямитель). Интенсивность магнитного поля в зазоре громкоговорителей бывает в среднем 8 000—10 000 *гс*, у высококачественных громкоговорителей она доходит до 15 000 *гс*.

Звуковая катушка, питаемая переменным током звуковой частоты от усилителя, колеблется в магнитном зазоре громкоговорителя. Она представлеят собой обмотку с четным числом слоев и выводами на одной стороне. Полное внутреннее сопротивление звуковой катушки для частот 800—1 000 *гц* для большинства громкоговорителей составляет 5—10 *ом*.

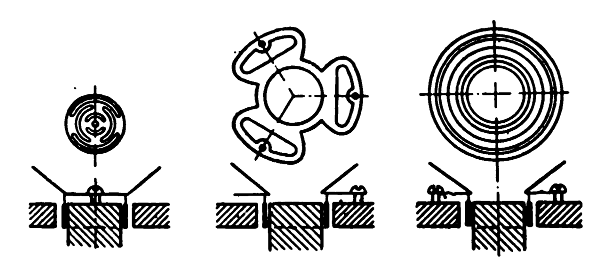


Рис. 28. Различные способы крепления диффузора к центрирующей шайбе.

Диффузор, представляющий собой усеченный конус, прикреплен со стороны большего диаметра к держателю, а со стороны меньшего диаметра — к центрирующей шайбе и звуковой катушке. Крепление диффузора должно быть выполнено безупречно, в противном случае могут возникнуть нежелательные дребезжания.

Различные способы крепления диффузора показаны на рис. 28. Такие системы крепления одновременно служат для центровки звуковой катушки, чтобы ось катушки совпадала с осью керна. В противном случае катушка будет касаться сердечника, что вызовет искажение звука (дребезжание), а также порчу громкоговорителя.

В настоящее время этот вид громкоговорителей производится разнообразных размеров, диаметром диффузора от 4 *см*, используемых в маломощных карманных транзисторных приемниках, до больших и мощных (до 30 *вт*), диффузор которых имеет диаметр до 35 *см*.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Этот тип громкоговорителей предназначен для воспроизведения высоких частот. Они бывают симметричной и несимметричной конструкции. Несимметричная конструкция такого громкоговорителя показана на рис. 29.

Перед прочным перфорированным электродом на небольшом расстоянии укреплена легкая мембрана из проводящего материала; между двумя электродами для уменьшения нелинейных искажений создается предварительное напряжение поляризации. Напряжение поляризации колеблется у различных видов громкоговорителей от

40 до 150 *в*. Симметричный электростатический громкоговоритель (рис. 30) имеет по сравнению с описанным выше некоторые преимущества. От симметричного громкоговорителя можно получить бóльшую мощность. Электростатические громкоговорители нашли применение сравнительно недавно. Можно надеяться, что благодаря хорошим качествам воспроизведения, они найдут широкое применение.

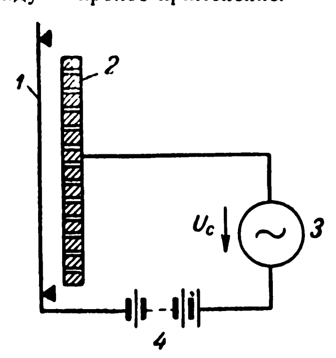


Рис. 29. Схематическое устройство несимметричного электростатического громкоговорителя.

1 — мембрана; *2* — неподвижный электрод; *3* — генератор низкочастотных сигналов; *4* — батарея для подачи поляризующего напряжения.

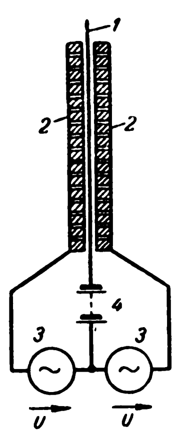


Рис. 30. Схематическое устройство симметричного электростатического громкоговорителя. (Обозначения те же, что на рис. 29).

ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

При создании пьезоэлектрических громкоговорителей используются пьезокристаллы, работающие на изгиб или скручивание. Пример конструкции пьезоэлектрического громкоговорителя приведен на рис. 31. Так как деформация кристалла, а отсюда и амплитуда колебаний диффузора мала, то такие громкоговорители применяются только для воспроизведения высоких частот. Громкоговорители этого типа имеют достаточно хорошую частотную характеристику, малые нелинейные искажения и небольшой вес, но обладают большой емкостью, создающей дополнительную нагрузку на усилитель. Несмотря на некоторые выгоды, эти громкоговорители из-за малой надежности почти не находят применения.

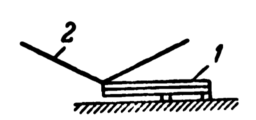


Рис. 31. Схематическое устройство пьезоэлектрического громкоговорителя.

1 - биморфный кристалл; *2* — диффузор.

РУПОРНЫЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛИ

Рупорный громкоговоритель состоит из трех основных элементов (рис. 32):

электромеханического преобразователя, назначение которого такое же, как и в громкоговорителях прямого излучения, диафрагмы, изготовленной из дюралюминия или другого подобного легкого материала и, наконец, из экспоненциального рупора. Для получения более широкой диаграммы направленности рупор нередко делают многосекционным.

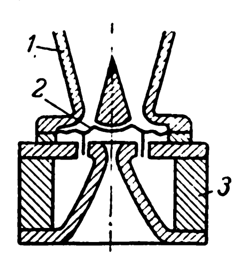


Рис. 32. Конструкция рупорного громкоговорителя.

1 — рупор; 2 — мембрана; 3 — магнит.

По сравнению с громкоговорителями прямого излучения рупорные громкоговорители обладают более высоким коэффициентом полезного действия (до 50%), но при приемлемых габаритах хуже воспроизводят низкие звуковые частоты. Поэтому они, как правило, используются как высокочастотные излучатели в составе многополосных агрегатов или как широкополосные излучатели невысокого качества.

АКУСТИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ГРОМКОГОВОРИТЕЛЕЙ

В громкоговорителях прямого излучения диффузор излучает звук не только передней стороной, но и задней. Так как звук, излучаемый задней стороной диффузора, находится в противофазе по отношению к звуку, излучаемому передней стороной, то на низких частотах, когда длина звуковой волны много больше, чем размеры диффузора, это приводит к резкому уменьшению излучаемой звуковой энергии (так называемое акустическое короткое замыкание) В результате уменьшается коэффициент полезного действия громкоговорителя и сужается диапазон воспроизводимых частот.

Для предотвращения акустического короткого замыкания на низких частотах громкоговоритель помещают в специальные акустические системы: твердый экран, ящик (открытый или закрытый) и т. п.

АКУСТИЧЕСКИЙ ЭКРАН

Акустический экран — простейшая акустическая система — представляет собой плотный щит достаточных размеров с отверстием для громкоговорителя.

Размер экрана определяется низшей из воспроизводимых частот $f_н$ и приближенно может быть рассчитан по формуле

$$a = \frac{120}{f_н} [м].$$

Нужно сказать, что при неизменных размерах экрана всегда выгодней для повышения отдачи на низких частотах применять громкоговорители с более низкой резонансной частотой $f_р$. Хорошие ре-

зультаты получаются при $f_н = 1{,}4 f_р$. В этом случае размер экрана

$$a = \frac{85}{f_р} \ [м].$$

Экран должен быть достаточно прочен, не резонировать при работе громкоговорителя. Отверстие для громкоговорителя часто

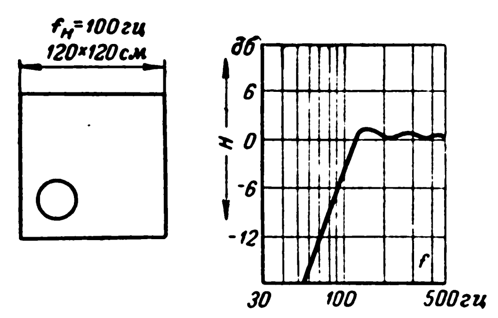


Рис. 33. Акустический экран и частотная характеристика громкоговорителя в экране в области низших частот.

делают не в центре экрана, а с краю (рис. 33), что выравнивает частотную характеристику системы воспроизведения.

ОТКРЫТЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Открытая акустическая система представляет собой ящик без задней стенки (рис. 34). Такой ящик эквивалентен плоскому акустическому экрану со стороной $a = b + 2h$, где b — ширина; h — глубина ящика.

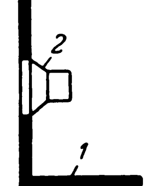


Рис. 34. Открытый резонатор. *1* — ящик; *2* — громкоговоритель.

На практике подавляющее число футляров радиоприемников представляет собой открытую акустическую систему.

ЗАКРЫТАЯ АКУСТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Закрытая акустическая система представляет собой ящик с задней стенкой. Акустическое короткое замыкание в такой системе полностью устранено.

Стенки ящика делают прочными и, для того чтобы уменьшить влияние резонансов внутрениего объема ящика, его изнутри обкладывают толстым слоем звукопоглощающего материала (до 5—10 *см*). Иногда стенки ящика делают непараллельными.

Закрытой акустической системе свойственен один значительный недостаток: благодаря упругости воздуха, заключенного в ящике, повышается собственная частота громкоговорителя, а с ней и ниж-

няя граничная частота излучаемого системой звука. Для ослабления этого явления нужно брать ящик с достаточно большим внутренним объемом, чтобы упругость воздуха, заключенного в нем, была много меньше упругости подвеса $K_п$ громкоговорителя, т. е.

$$V \gg \frac{\rho c^2 S^2}{K_п},$$

где ρ — плотность воздуха;

c — скорость распространения звука в воздухе;

S — излучающая поверхность диффузора.

Упругость подвеса можно определить, зная резонансную частоту громкоговорителя:

$$K_п = 4\pi^2 f_р^2 m,$$

где m — масса подвижной части громкоговорителя;

$f_р$ — резонансная частота громкоговорителя.

АКУСТИЧЕСКИЙ ФАЗОИНВЕРТОР

Акустический фазоинвертор — разновидность закрытой акустической системы, получившей широкое распространение в последние годы. Он представляет собой закрытый ящик, на передней панели которого обычно вблизи громкоговорителя вырезается отверстие. Иногда изнутри к передней панели ящика напротив отверстия прикрепляют отрезок трубы — горловину. Ящик с горловиной и отверстием представляет собой резонансную систему (резонатор Гельмгольца), собственная частота которой, зависящая от объема ящика, размеров отверстия и горловины, выбирается равной или меньшей резонансной частоты громкоговорителя. В этом случае на низких частотах звук, излучаемый передней стороной диффузора громкоговорителя, и звук, излучаемый обратной стороной диффузора через отверстие, оказывается в фазе, т. е. отдача звуковой энергии возрастает. Частотная характеристика полного внутреннего сопротивления громкоговорителя Z, помещенного в фазоинверторе, имеет вид двугорбой кривой, как показано на рис. 35.

Объем фазоинвертора можно рассчитать по формуле (рис. 36):

$$V = 3 \cdot 10^4 \frac{S}{f_н (L + 1{,}7R)} \ [дм^3],$$

где S — площадь отверстия, *см*;

L — длина горловины, *см*;

$R = \sqrt{\frac{S}{\pi}}$ — эквивалентный радиус отверстия, *см*. В случае прямоугольного отверстия со сторонами a и b $R = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$;

$f_н$ — низшая резонансная частота (ящика).

Площадь отверстия обычно выбирают в пределах (от 0,5 до 1) $S_д$, где $S_д$ — действующая поверхность диффузора. Если отверстие прямоугольное, то соотношение сторон выбирают равным 1,5. Длину горловины берут равной или меньше $2R$, т. е. $L \leqslant 2R$. Иногда перед отверстием устанавливают передвижные шторки, при помощи которых можно менять площадь отверстия, т. е. менять резонансную частоту фазоинвертора и тем самым подбирать наилучшее качество звучания.

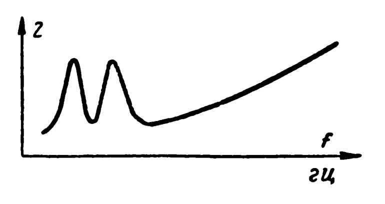


Рис. 35. Частотная характеристика полного сопротивления громкоговорителя, помещенного в фазоинвертор.

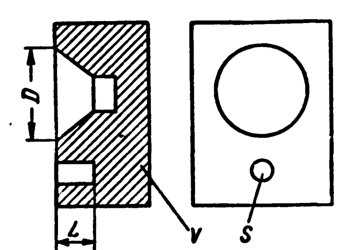


Рис. 36. К расчету фазоинвертора.

ГРОМКОГОВОРИТЕЛЬНЫЕ КОЛОНКИ

Для озвучивания открытых пространств или помещений с длительной реверберацией применяют системы, называемые громкоговорительными колонками, которые обладают ярко выраженным направленным излучением. Схема их устройства и диаграмма направленности показаны на рис. 37,*а, б*.

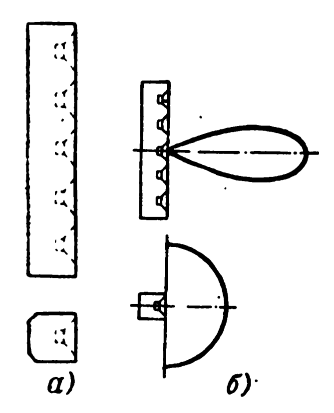


Рис. 37. Схематическое устройство громкоговорительной колонки (*а*) и диаграмма ее направленности (*б*).

Громкоговорительная колонка представляет собой закрытый ящик, на передней панели которого расположена цепочка из громкоговорителей. Требования, предъявляемые к ящику для громкоговорительной колонки такие же, как и к ящику для закрытой акустической системы. Так как акустическая система обладает направленным излучением тогда, когда ее размер больше, чем длина волны излучаемого звука, то длина громкоговорительной колонки должна быть достаточно большой. Громкоговорительную колонку желательно ориентировать на слушателя.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ АКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

При создании акустических систем необходимо учитывать некоторые требования, не входящие в расчет самой конструкции. Прежде всего это выбор материала для изготовления акустической системы. Обычно рекомендуется изготовлять акустические системы из деревянных панелей толщиной 12—15 *мм*. Хорошим материалом служит фанера. Стенки ящика должны быть плотно подогнаны и хорошо скреплены между собой, для того чтобы при работе громкоговорителя не возникали вибрации на резонансных частотах панелей (стенок ящика).

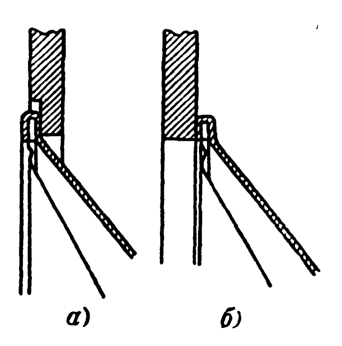


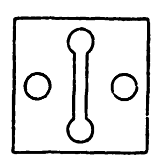
Рис. 38. Крепление громкоговорителя в акустической системе.

а — правильное; *б* — неправильное.

Влияние на частотную характеристику оказывают также размещение и монтаж громкоговорителя. Выше упоминалось о том, что громкоговоритель не следует размещать на оси симметрии акустической системы. Это приводит к ухудшению частотной характеристики излучающей системы.

На рис. 38,*б* показано неправильное крепление громкоговорителя в акустической системе, способствующее ослаблению воспроизведения высоких частот. Правильный способ крепления показан на рис. 38,*а*.

Расположение акустической системы в помещении также влияет на качество воспроизведения. Можно также упомянуть о способе,



Диаметр диффузора, *см*	20	25	30
Ширина щели, *мм*	25	25	25
Диаметр отверстий, *мм*	50	66	75
Длина щели, *мм*	75	88	100
Общая длина щели, *мм*	175	220	250

Рис. 39. Конфигурация отверстия для громкоговорителя.

позволяющем улучшить характеристику направленности акустической системы на высоких частотах: применение отверстий для громкоговорителя специальной формы.

На рис. 39 показана конфигурация одного такого отверстия для громкоговорителя, а ниже приведены его размеры. Характеристика излучения на низких частотах остается неизменной, тогда как угол излучения высоких частот увеличивается от 2,2 до 2,5 раза. Хотелось бы подчеркнуть, что в этой главе был рассмотрен самый важный и до сих пор, к сожалению, остающийся без внимания участок электроакустической цепи.

Естественно, что безупречная аппаратура создается в результате выполнения самых точных требований, проверяемых объективными измерениями. С другой стороны понятно, что точным соблюдением всех акустических, физических и других условий высококачественного воспроизведения звука можно достичь хороших результатов.

УСИЛИТЕЛИ

В настоящее время ламповые усилители представляют собой наиболее совершенный участок цепи воспроизведения звука. С их помощью можно не только выполнить необходимые требования высококачественного воспроизведения, но и до известной степени корректировать ошибки остальных узлов цепи воспроизведения звука (микрофонов, звукоснимателей, громкоговорителей).

Усилители можно условно разделить на три группы: входные (предварительные) усилители, корректирующие и усилители мощности (оконечные).

В предварительном усилителе происходит усиление низкочастотных сигналов, снимаемых с микрофона, звукоснимателя и т. п., которые затем передаются в корректирующий усилитель. В корректирующем усилителе можно, исходя из потребностей, изменять частотную характеристику, т. е. регулировать усиление высших или низших частот диапазона. С корректирующего усилителя сигнал поступает на усилитель мощности, назначение которого состоит в том, чтобы усилить мощность сигнала до величины, необходимой для нормальной работы громкоговорителя.

ВХОДНОЙ УСИЛИТЕЛЬ

Как понятно из названия, входной усилитель — это первое звено цепи усиления. Его основное назначение — снять без потерь сигнал с преобразователя (микрофона, звукоснимателя и т. п.) и усилить его. Кроме того, входной усилитель несколько исправляет частотную характеристику преобразователя. Например, на рис. 40 приведены частотные характеристики пьезоэлектрического и электромагнитного звукоснимателей. Показанные на рис. 40 кривые значительно отличаются друг от друга.

Если сигналы от таких звукоснимателей подать на усилители с одинаковыми частотными характеристиками, то выходные сигналы с усилителей будут также значительно отличаться друг от друга. С подобными явлениями мы сталкиваемся и при использовании

микрофонов и даже при проигрывании граммофонных пластинок, имеющих различные скорости вращения (рис. 41).

Для того чтобы снять без потерь сигнал с преобразователя, необходимо согласовать входное сопротивление усилителя с выходным сопротивлением преобразователя. В случае, если к усилителю

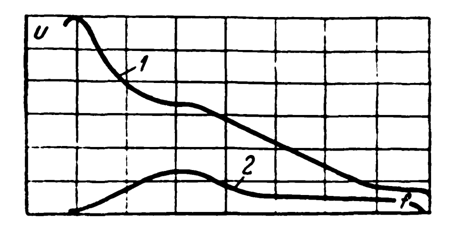


Рис. 40. Частотные характеристики звукоснимателей.

1 — пьезоэлектрического; 2 — электромагнитного.

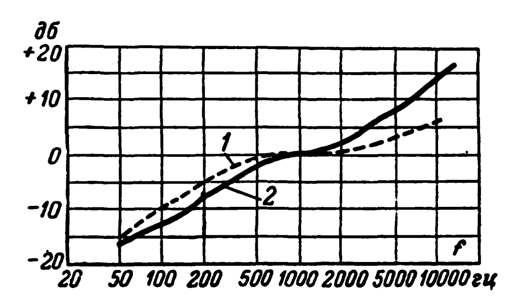


Рис. 41. Частотные характеристики граммофонных пластинок.

1 — обычных пластинок (78 *об/мин*); 2 — долгоиграющих ($33^1/_3$ *об/мин*).

подсоединяется источник электрических сигналов (преобразователь) с низким выходным сопротивлением, то согласование обычно осуществляется при помощи трансформатора, называемого согласующим или входным. Коэффициент трансформации согласующего трансформатора определяется как

$$p = \frac{n_2}{n_1} = \sqrt{\frac{R_2}{R_1}},$$

где R_2 — входное сопротивление усилителя;

R_1 — выходное сопротивление источника сигналов;

n_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора;

n_1 — число витков первичной обмотки трансформатора.

Источники электрических сигналов с высоким выходным сопротивлением подключаются к усилителям через так называемые, *RC*-цепочки (*RC*-фильтры). Частотные характеристики *RC*-цепочек стараются подобрать таким образом, чтобы исправить частотные искажения подключаемых к усилителю преобразователей.

Понятно, что таких *RC*-фильтров может быть сколь угодно много, поэтому приведем здесь несколько типичных примеров.

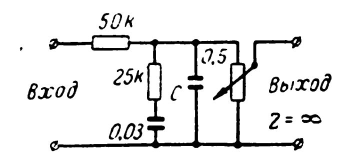


Рис. 42. Простой корректирующий фильтр.

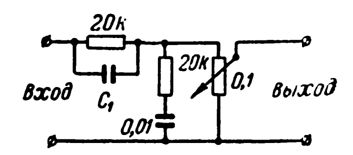


Рис. 43. Вариант схемы простого корректирующего фильтра.

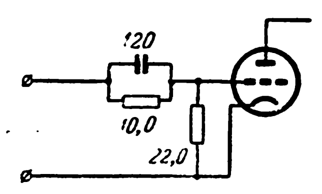


Рис. 44. Схема корректирующего фильтра для присоедиинения пьезоэлектрического звукоснимателя.

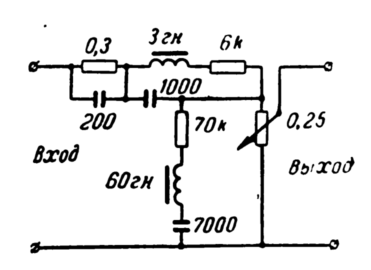


Рис. 45. Схема фильтра с индуктивностями.

Для электродинамических и электромагнитных звукоснимателей можно применять одинаковые фильтры. У низкоомных звукоснимателей этого вида корректирующие фильтры помещают после согласующего трансформатора. Простой корректирующий фильтр приведен на рис. 42. Конденсатор *С* выбирают емкостью от 2 000 до 25 000 *пф* в зависимости от используемого звукоснимателя.

На рис. 43 приведен другой простой корректирующий фильтр. Здесь комбинация из последовательно соединенных резистора, сопротивлением 20 *ком* и конденсатора, емкостью 10 000 *пф* повышает передачу низших частот, а соединенные параллельно резистор, сопротивлением 20 *ком* и конденсатор C_1, емкостью от 50 до 3 000 *пф* повышают передачу частот выше 4 000 *гц*.

Полное сопротивление пьезоэлектрического звукоснимателя, эквивалентное емкостному сопротивлению конденсатора (величины 1 000—2 000 *пф*), велико. Практическое присоединение такого звукоснимателя показано на рис. 44. Корректирующие цепи должны быть присоединены как можно ближе к входу лампы, так чтобы емкость проводов, присоединенных к управляющей сетке лампы, была меньше собственной емкости звукоснимателя.

На рис. 45 показана схема корректирующего фильтра, который с обычным кристаллическим звукоснимателем дает весьма хорошие результаты. Так как в этом фильтре имеется достаточно большая индуктивность, на которую могут воздействовать помехи (электромагнитные поля), то этот фильтр необходимо правильно размещать и экранировать.

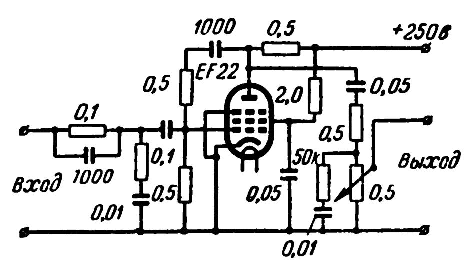


Рис. 46. Схема сложного корректирующего фильтра с лампой для электромагнитного звукоснимателя.

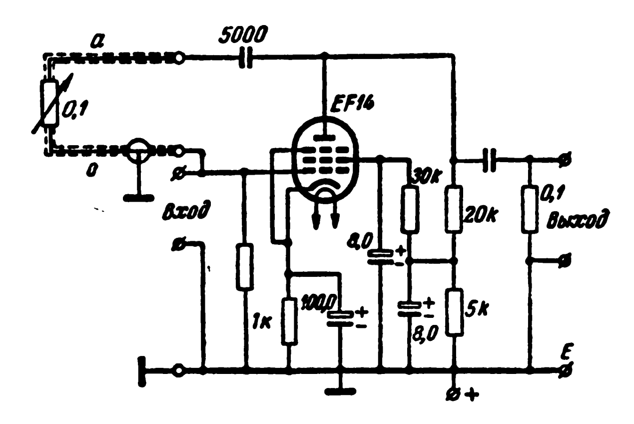


Рис. 47. Схема входного усилителя с корректирующими цепями для пьезоэлектрического звукоснимателя.

Приведенная схема фильтра не только хорошо выравнивает частотную характеристику, но и снимает шипение иглы, особенно при проигрывании старых граммофонных пластинок.

Иногда лампа входного усилителя входит также в состав корректирующей цепочки. Схема такого включения показана на рис. 46. На этой схеме приведен более сложный, но весьма эффективный входной усилитель для электромагнитного звукоснимателя. Главная особенность такой схемы заключается в отрицательной обратной связи с анода лампы на ее управляющую сетку (через резистор, сопротивлением 0,5 *Мом* и конденсатор, емкостью 1 000 *пф*).

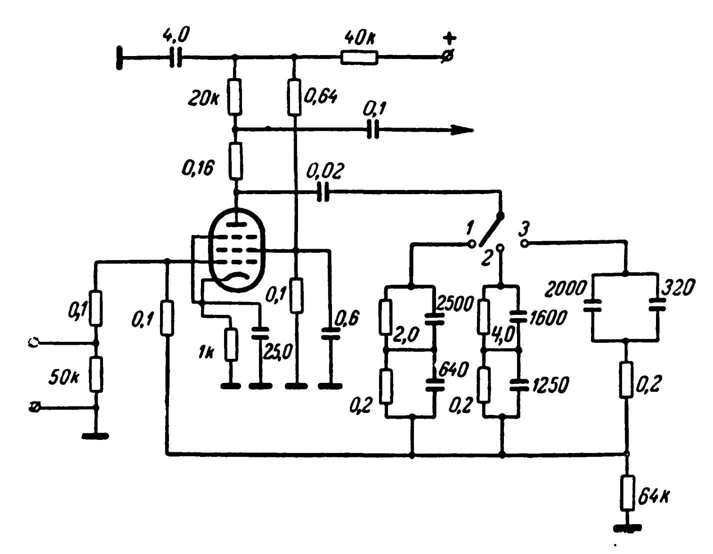


Рис. 48. Схема коррекции для проигрывания граммофонных пластинок на разные скорости.

Аналогичная схема усилителя для пьезоэлектрического звукоснимателя приведена на рис. 47. В основном она сходна с предыдущей, однако здесь глубину отрицательной обратной связи можно изменять, а следовательно, можно изменять в некоторых пределах и частотную характеристику.

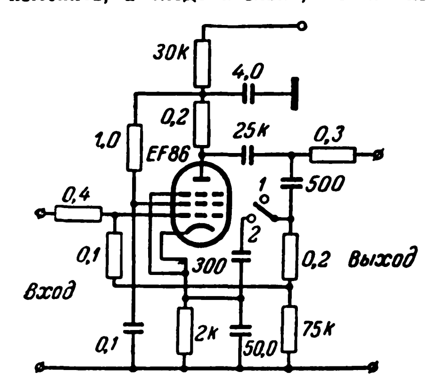


Рис. 49. Упрощенная схема коррекции.

Приведенные выше схемы разрешали основные вопросы только с точки зрения воспроизведения записи с граммофонных пластинок одного вида. Если необходимо проигрывать одним звукоснимателем граммофонные пластинки всех скоростей, то для высококачественного воспроизведения желательно применение более сложного корректирующего устройства (рис. 48). Это также схема с отрицательной обратной связью, идущей с анода на управляющую сетку лампы. Однако эта цепь обратной связи состоит из отдельных переключающихся корректирующих цепей для проигрывания пластинок с разными скоростями вращения (78, 45 и 33 $^{1}/_{3}$ *об/мин*).

Если входной усилитель расположен вблизи проигрывателя, то желательно, чтобы переключатель корректирующих цепей был механически соединен с переключателем скоростей проигрывателя. Тогда при переключении скорости вращения диска будет автоматически включаться необходимая цепь коррекции усилителя.

Хорошая работа этой схемы особенно ценится любителями, стремящимися к высококачественному воспроизведению. Менее требовательные любители могут ограничиться более простой схемой коррекции, показанной на рис. 49.

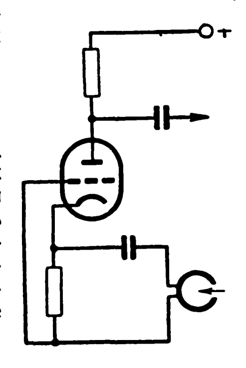


Рис. 50. Возможное включение низкоомной магнитофонной головки.

К изготовлению входных усилителей собственными силами следует подходить с большим вниманием. Надо помнить, что на вход усилителя подаются сигналы очень низких уровней. Ошибочное размещение деталей или неправильный монтаж схемы могут послужить причиной проникновения посторонних напряжений на управляющую сетку входной лампы; эти напряжения могут усилиться одновременно с полезным сигналом настолько, что все воспроизведение будет совершенно искажено.

Прежде всего посторонние воздействия ограничивают правильным размещением элементов схемы, а затем экранированием необходимых цепей. Однако экранирование следует проводить очень осторожно, так как оно может привести к искажению частотной характеристики на высоких частотах. Лучший способ — монтировать корректирующие цепи непосредственно на шасси граммофона. Иногда бывает полезно объединить переключатель скорости с переключателем коррекции.

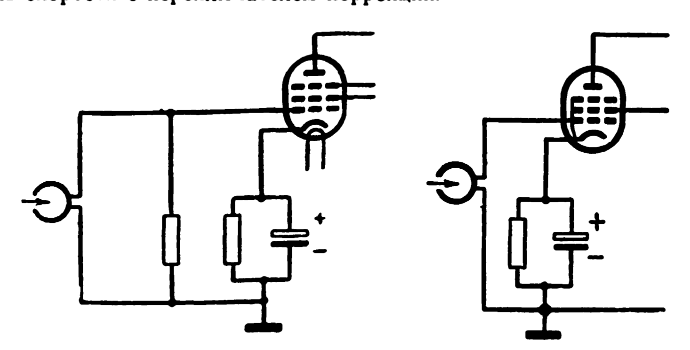


Рис. 51. Схема включения высокоомных магнитофонных головок.

При самом совершенном методе записи звука — магнитном, — для записи, воспроизведения и стирания применяют магнитофонные головки, которые могут быть как низкоомными, так и высокоомными. Низкоомные головки применяются в профессиональной аппара-

туре, т. е. в телевизионных и радиовещательных студиях. С входными усилителями их обычно согласуют при помощи трансформаторов. В отдельных случаях низкоомные головки можно включать так, как показано на рис. 50.

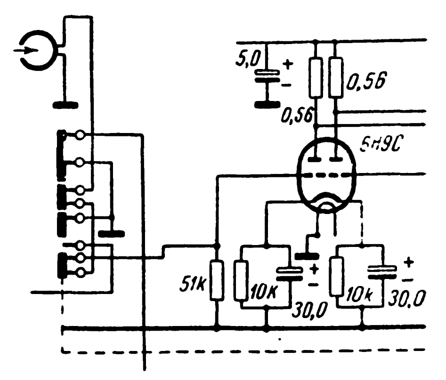


Рис. 52. Схема входной части усилителя воспроизведения магнитофона «Днепр-5».

Типичные схемы включения высокоомных магнитофонных головок приведены на рис. 51.

Практические схемы присоединения головок к входному усилителю воспроизведения приведены на рис. 52, 53.

На рис. 52 показана схема входа усилителя воспроизведения советского магнитофона «Днепр-5». Из схемы видно, что универсальная головка, выполняющая функцию звукоснимателя, присоединена непосредственно к управляющей сетке левого (по схеме) триода лампы 6Н9С; параллельно ей, как утечка сетки, включен резистор с достаточно малым сопротивлением — 51 *ком*.

На рис. 53 приведена схема входной цепи одного из магнитофонов фирмы Грундиг. Типичным для этого включения будет очень высокое сопротивление утечки сетки входной лампы, которая в этом примере равна 10 *Мом*. Входная цепь при таком включении будет очень чувствительна к наводкам, о чем необходимо всегда помнить.

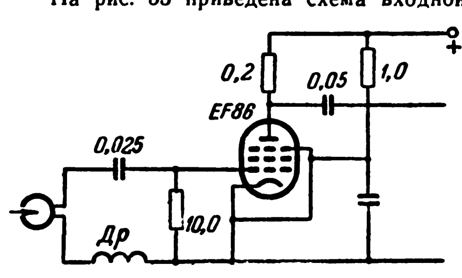


Рис. 53. Схема входной части усилителя воспроизведения одного из магнитофонов фирмы Грундинг.

В этом разделе были разобраны и объяснены лишь некоторые вопросы входных цепей и усилителей с точки зрения их устройства и вида частотных характеристик. Из огромного количества вопросов и проблем были выбраны лишь самые типичные и чаще встречающиеся.

КОРРЕКТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ

Усиленный входным усилителем низкочастотный сигнал поступает на корректирующий усилитель, где можно, по желанию, изменять частотную характеристику воспроизведения. Обычно эти уси-

лители содержат две лампы, между которыми установлены цепи регулировок, позволяющие независимо регулировать низкие и высокие частоты.

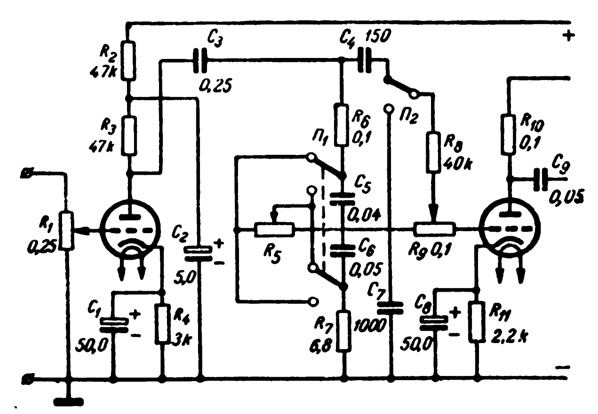


Рис. 54. Схема корректирующего усилителя с плавной регулировкой высоких и низких частот.

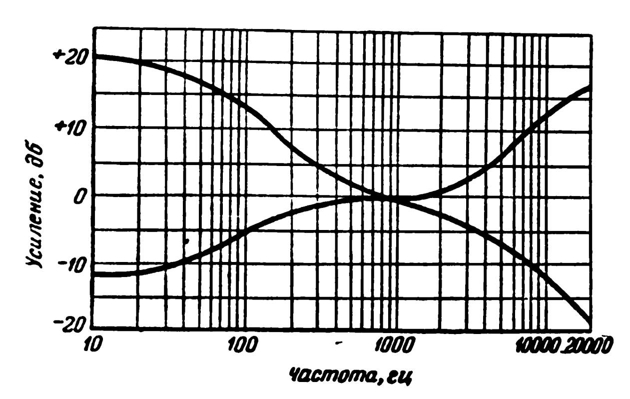
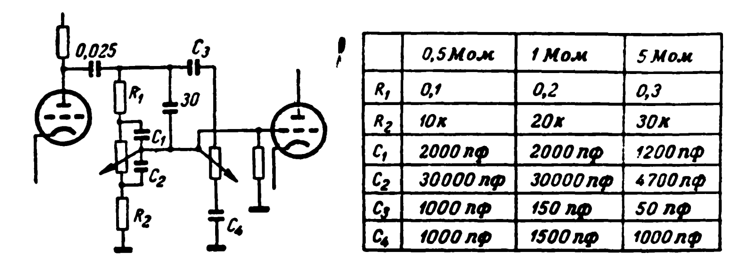


Рис. 55. Частотные характеристики усилителя по схеме, изображенной на рис. 54.

В специальных усилителях полоса частот разделяется на несколько участков (например, на три или четыре); кроме того, можно изменять частотные характеристики и на средних участках диапазона частот. Коррекция позволяет регулировать частотную характеристику при помощи переключателя (скачком) и потенциометра (плавно).

Оба способа в серийных усилителях объединены. В некоторых усилителях, кроме этих установочных коррекций, имеются еще кнопки «речь», «джаз» и т. п.

На рис. 54 приведена одна из многих схем, используемых в низкочастотных усилителях. Из схемы видно, что между двумя триодами включены плавные регуляторы высоких и низких частот, Кроме того, имеются еще переключатели $П_1$ и $П_2$, которые разграничивают пределы регулирования. В одном из положений переклю-



	0,5 Мом	1 Мом	5 Мом
R_1	0,1	0,2	0,3
R_2	10к	20к	30к
C_1	2000 пф	2000 пф	1200 пф
C_2	30000 пф	30000 пф	4700 пф
C_3	1000 пф	150 пф	50 пф
C_4	1000 пф	1500 пф	1000 пф

Рис. 56. Широко используемая схема регулировки низких и высоких частот.

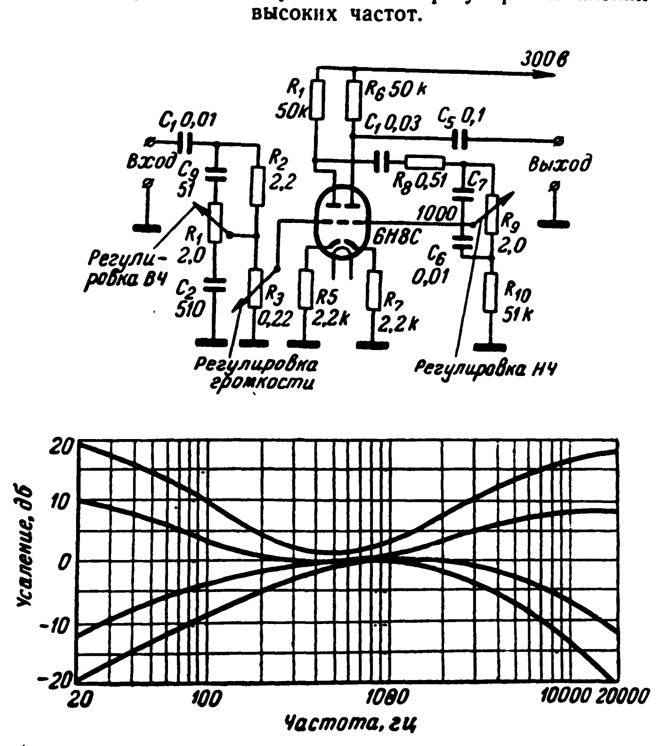


Рис. 57. Схема корректирующего усилителя.

чателя $П_1$ предел регулирования меньше, в другом — больше. Переключатель $П_2$ выключает потенциометр R_9 из работы и включает конденсатор C_7, срезающий высокие частоты. Потенциометр R_5 имеет логарифмическую, а R_9 — линейную зависимость от угла поворота. На рис. 55 показаны частотные характеристики усилителя при различных положениях потенциометров R_5, R_9 и переключателей $П_1$ и $П_2$.

Рис. 58. Схема корректирующего усилителя с частотно-зависимой отрицательной обратной связью.

На рис. 56 показана схема, в настоящее время широко используемая в низкочастотной технике. Она аналогична предыдущей, но с несколько измененными регулировками. В относящейся к рисунку таблице приведены значения сопротивлений резисторов и емкостей конденсаторов при различных сопротивлениях потенциометров. Другой способ включения корректирующих цепей показан на рис. 57, там же приведены частотные характеристики усилителя при различных положениях потенциометров R_1 и R_9.

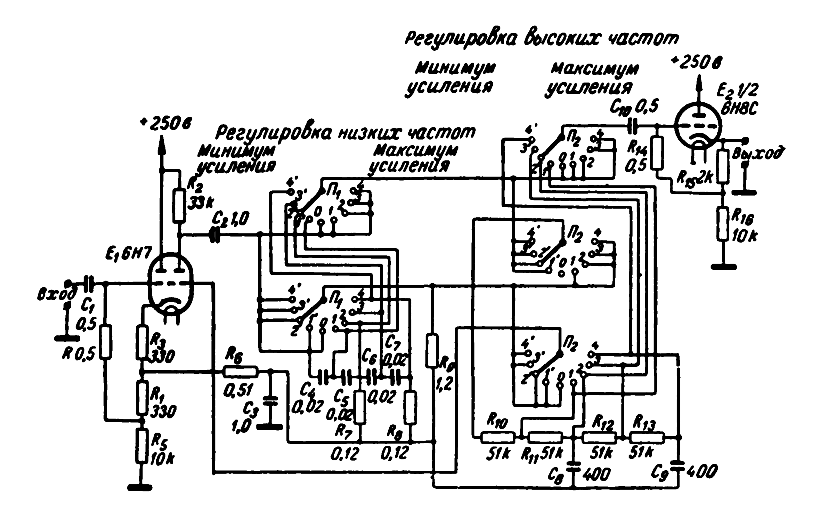
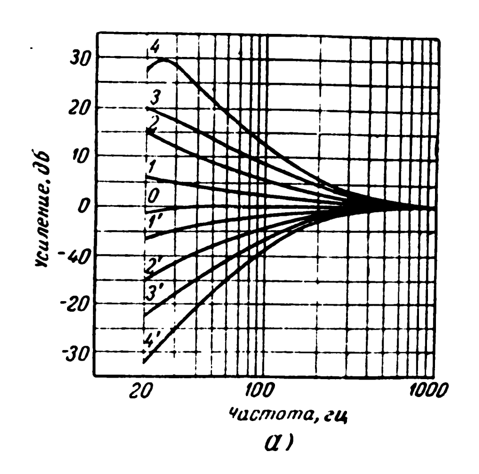


Рис. 59. Сложная схема корректирующего усилителя с частотно-зависимой отрицательной обратной связью.



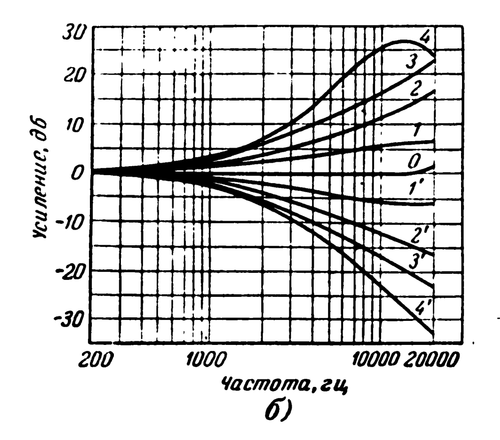


Рис. 60. Частотные характеристики усилителя в зависимости от положений переключателей $П_1$ и $П_2$.

а — в области низких частот; *б* — в области высоких частот.

В приведенных выше примерах частотная характеристика изменялась от воздействия частотно зависимых *RC*-цепей, расположенных на пути низкочастотных сигналов.

Однако для изменения частотной характеристики можно использовать также регулируемую отрицательную обратную связь Такая схема приведена на рис. 58. Отрицательная обратная связь взята с анода лампы на управляющую сетку; величина этой связи зависит от отношения элементов делителя C_2, R_2, R_4. При регулировке

низких частот потенциометром R_1 в цепь обратной связи вводится конденсатор C_1, изменяющий отношение верхней части делителя. При регулировке высоких частот, наоборот, потенциометром R_6 изменяется отношение нижней части делителя. В обоих рассмотренных случаях изменяется величина отрицательной обратной связи, а тем самым и частотная характеристика усилителя. Более сложная схема этого типа приведена на рис. 59. Для регулировки частотной характеристики и усиления в ней использован сдвоенный переключатель на девять положений для регулировки низких частот и строенный переключатель, также на девять положений, для регулировки высоких частот. Частотные характеристики для всех положений переключателей $П_1$ и $П_2$ приведены на рис. 60.

Таким образом, можно в широких пределах изменять частотную характеристику двумя способами:

1) включением частотно-зависимых регулируемых *RC*-цепей на пути низкочастотных сигналов;

2) использованием переменной частотно-зависимой отрицательной обратной связи.

Оба способа приблизительно равнозначны, т. е. на практике можно с одинаковым успехом пользоваться как тем, так и другим способом.

ОКОНЕЧНЫЙ (ВЫХОДНОЙ) КАСКАД

Оконечный каскад при конструировании высококачественной аппаратуры для воспроизведения звука представляет собой достаточно сложную проблему. Здесь уже недостаточно усиливать напряжение, так как цель оконечного каскада — усиление мощности при наименьших нелинейных искажениях.

Собирают оконечный усилитель обычно на пентодах или лучевых тетродах, реже на триодах.

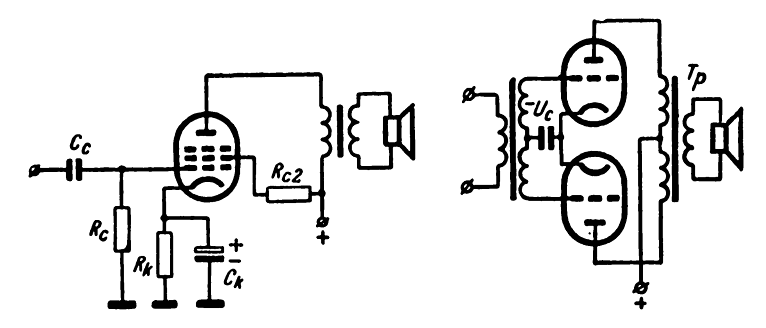


Рис. 61. Схема однотактного оконечного каскада.

Рис. 62. Схема двухтактного оконечного каскада.

Все оконечные усилители разделяются на однотактные (рис. 61) и двухтактные (рис. 62). Каждая из ламп может работать в различных режимах: в режиме А, в режиме В или, наконец, в режиме АВ. В режиме А лампа усиливает переменный ток, в течение всего времени подачи сигнала на управляющую сетку. Напряжение

смещения на управляющую сетку выбирается так, чтобы рабочая точка находилась посередине линейного участка характеристики лампы. Это напряжение может быть получено или автоматически, или от особого источника питания (выпрямителя). Номинальные искажения такого усилителя малы, однако к. п. д. также очень мал (максимум 30%). При этом постоянная составляющая анодного тока — значительна. Такой режим усиления используется главным образом в усилителях малой мощности.

При усилении в режиме B лампа работает только один полупериод возбуждающего напряжения, поступающего на управляющую сетку. Рабочая точка устанавливается в начале характеристики лампы. Напряжение смещения на сетку лампы должно быть достаточно большим и постоянным. Подобную схему можно использовать только при двухтактном включении ламп. Коэффициент полезного действия такого усилителя достигает 50—60%.

Режим AB представляет собой промежуточный между режимами A и B. В этом режиме рабочую точку выбирают между серединой линейной части характеристики и ее началом. Таким образом, при отрицательном полупериоде на управляющей сетке форма анодного тока не будет соответствовать форме возбуждающего напряжения на управляющей сетке. Поэтому эта схема не находит применения в однотактных усилителях с одной лампой, а используется только в двухтактных каскадах. Коэффициент полезного действия в этом режиме больше, чем в режиме A, и достигает 45%. Усилитель режима AB может работать или с сеточным током или без него.

Для обозначения режимов работы без сеточных токов применяют буквы B, AB_1, а режим с токами сетки обозначают буквами AB_2. Необходимо помнить, что для получения воспроизведения высокого качества следует проектировать усилитель, работающий без сеточных токов. Правильный выбор режима усилителя обеспечивает условия для высококачественной работы оконечного каскада.

Большую помощь (особенно для радиолюбителя) представляют каталоги ламп с характеристиками и оптимальными режимами.

ОДНОТАКТНЫЙ ОКОНЕЧНЫЙ КАСКАД

При малых мощностях, которые вполне достаточны в нормальных помещениях (т. е. до 3 *вт*), можно построить усилитель с оконечным каскадом на одной лампе.

Как было сказано в общей части, эти усилители работают в режиме A и в них применяются как триоды, так и пентоды.

На рис. 63 показана типичная схема однотактного оконечного каскада с современным пентодом EL84. Частотную характеристику определяют элементы R_cC_c — в цепи управляющей сетки лампы, $R_кC_к$ — в катоде и, конечно, выходной трансформатор. Так как максимальное сопротивление резистора R_c для данной лампы — величина определенная, то величина C_c отвечает неравенству

$$C_c \geqslant \frac{160}{f_н R_c} \; [мкф],$$

где $f_н$ — нижняя граничная частота, *гц*;

$R_с$ — сопротивление утечки управляющей сетки, *Мом*.

Сопротивление резистора в цепи катода выбирают в зависимости от напряжения, необходимого для выбора правильного режима оконечной лампы. Расчет конденсатора в цепи катода до сих пор остается сложным, так как на его емкость влияет сразу несколько факторов, как, например, крутизна лампы S и т. п. Для расчета емкости конденсатора $C_к$ существует неравенство

$$C_к \geqslant \frac{1,59\cdot 105}{R_к f_н}\sqrt{(1+SR_к\cdot 10^{-3})^2-2},\ [мкф].$$

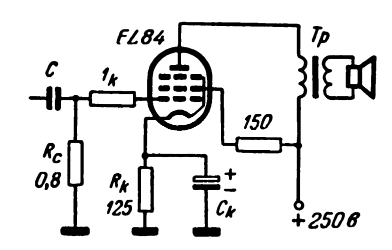


Рис. 63. Практическая схема однотактного оконечного каскада

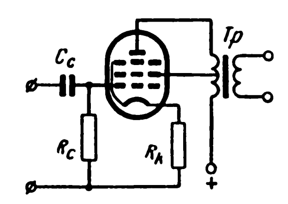


Рис. 64. Ультралинейная схема оконечного каскада.

Если сопротивление резистора в цепи катода лампы в инструкции не дается, то его определяют из уравнения

$$R_к = \frac{U_{с0}}{I_{к0}},$$

где $U_{с0}$ — постоянное напряжение сеточного смещения, *в*;

$I_{к0}$ — катодный ток покоя, т. е. сумма анодного тока и тока экранирующей сетки, *а*.

В цепи управляющей и экранирующей сеток включаются резисторы, цель которых — устранение паразитных колебаний. Сопротивление резистора в цепи управляющей сетки приблизительно равно 1 *ком*, а в цепи экранирующей сетки — колеблется от 50 до 200 *ом*.

Разберем два примера современных схем оконечных каскадов. На рис. 64 приведена схема, называемая ультралинейной. Она отличается от обычной схемы тем, что экранирующая сетка присоединена к отводу первичной обмотки выходного трансформатора. В зависимости от того, насколько этот отвод отстоит от конца первичной обмотки выходного трансформатора, подключенного к аноду лампы, различают триодное или пентодное включение лампы. От этого зависит линейность частотной характеристики оконечного каскада.

Таким образом, достигается совмещение хороших качеств как триодного, так и пентодного включения. Отвод от первичной обмотки выходного трансформатора выбирают в пределах 20—40% от

общего количества витков обмотки, считая от конца, к которому подключается анодное напряжение.

На рис. 65 приведена другая современная схема, предложенная Муллардом. Имеются две лампы, соединенные последовательно. Первая из них (EF86) имеет в анодной цепи необычно высокое сопротивление (2,2 *Мом*), поэтому на ее аноде оказывается очень низкое рабочее напряжение и через нее течет очень малый ток. Экранирующая сетка этой лампы присоединена к катоду следую-

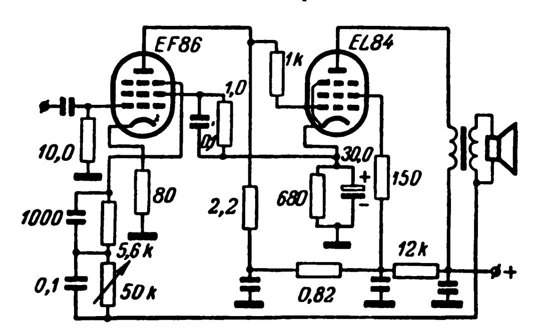


Рис. 65. Схема предварительного и оконечного каскадов усилителя без переходного конденсатора.

щей, оконечной лампы (EL84). При этом получается необходимая величиина отрицательной обратной связи. Большое сопротивление резистора в цепи катода оконечной лампы выбрано для того, чтобы на катоде создавалось достаточно большое напряжение, необходимое для нормального режима обеих ламп.

Непосредственная связь (без конденсатора) между лампами предотвращает сдвиг фаз на низких частотах, что в свою очередь способствует стабильной работе обратной связи между выходным трансформатором и катодом лампы предварительного каскада.

ДВУХТАКТНЫЙ ОКОНЕЧНЫЙ КАСКАД

Несмотря на большую сложность конструкции двухтактного усилителя по сравнению с однотактным, двухтактный усилитель все чаще используется в современной низкочастотной технике для малых мощностей в режиме А и для больших мощностей в режиме АВ.

Каскады в режиме В используются большей частью для мощностей, которые не применяются при обычном воспроизведении. Эти усилители обладают следующими тремя преимуществами: выходной трансформатор не имеет постоянного подмагничивания; коэффициент нелинейных искажений уменьшается по сравнению с однотактным каскадом; сопротивление нагрузки несколько уменьшается, что дает возможность присоединять к ним высокоомные громкоговорители непосредственно без выходного трансформатора; для при-

соединения же низкоомных громкоговорителей достаточны довольно простые выходные трансформаторы.

На рис. 62 показана классическая схема двухтактного оконечного каскада. Обе управляющие сетки получают сигналы возбуждения одного уровня, но противоположные по фазе. При этом включении сопротивление нагрузки между анодами для режима А будет в 2 раза больше, а для режима В — в 4 раза больше внутреннего сопротивления лампы.

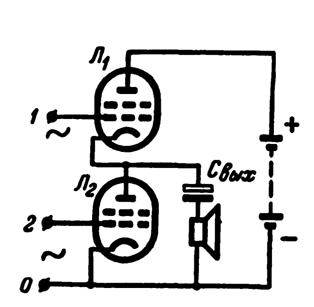


Рис. 66. Схема оконечного каскада без выходного трансформатора.

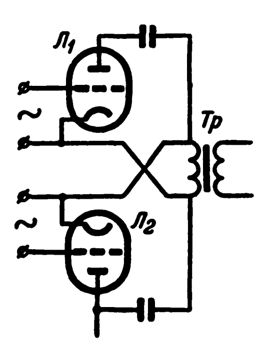


Рис. 67. Разновидность включения ламп в схеме оконечного каскада.

Значительный шаг был сделан при разработке оконечных каскадов без выходного трансформатора. Сейчас определились уже два таких способа. Фирмой Филипс была разработана схема, показанная на рис. 66.

На рис. 67 приведена схема включения, известная под названием РРР. Обе схемы основаны на двухтактном включении с удобным подключением ламп и нагрузки. Этот способ включения позволил уменьшить общее сопротивление нагрузки на четверть первоначальной величины, так как лампы работают по переменному току параллельно, а по постоянному — последовательно. В классической двухтактной схеме это было как раз наоборот. Практическое включение каскадов по обоим способам показано на рис. 68 и 69.

Необходимость получения двух противофазных напряжений для раскачки двухтактных оконечных каскадов долгое время была причиной редкого их использования. Раньше для этой цели применялся дополнительный каскад с двухтактным трансформатором. Эта составная часть усилителя была весьма слабым звеном как в конструктивном, так и в электрическом отношениях: повышалась чувствительность к посторонним электромагнитным полям и, наконец, было невозможно регулировать соотношения плеч, например при старении ламп, их замене и т. п. Поэтому начали изыскивать другие пути — использовать для этих целей лампы.

Таким образом, в течение ряда лет было создано несколько ламповых схем (фазоинверторов) для поворачивания фаз на 180°.

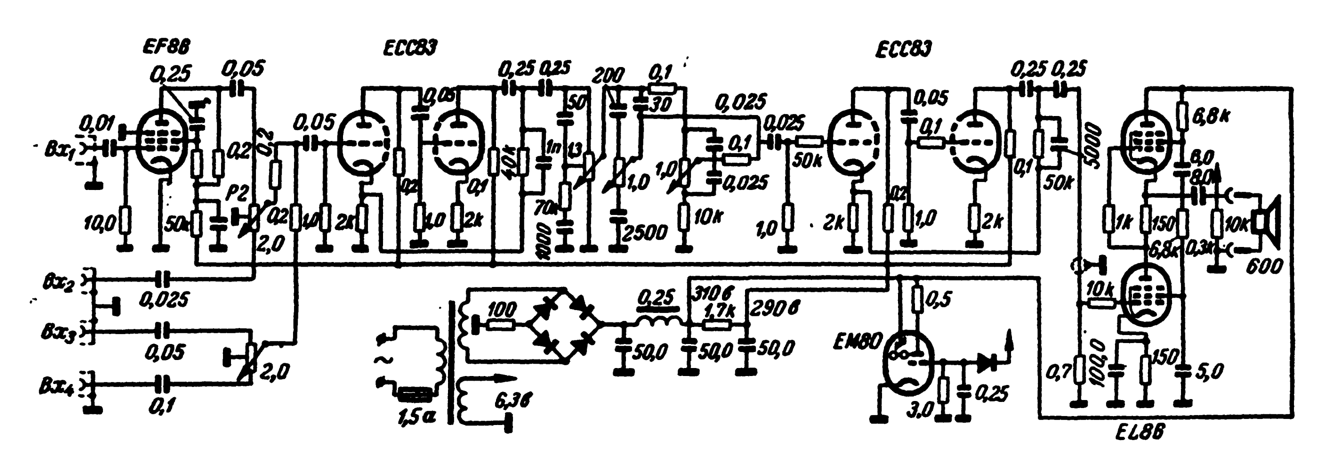


Рис. 68. Полная схема усилителя по принцнпу, показанному на рис. 66.

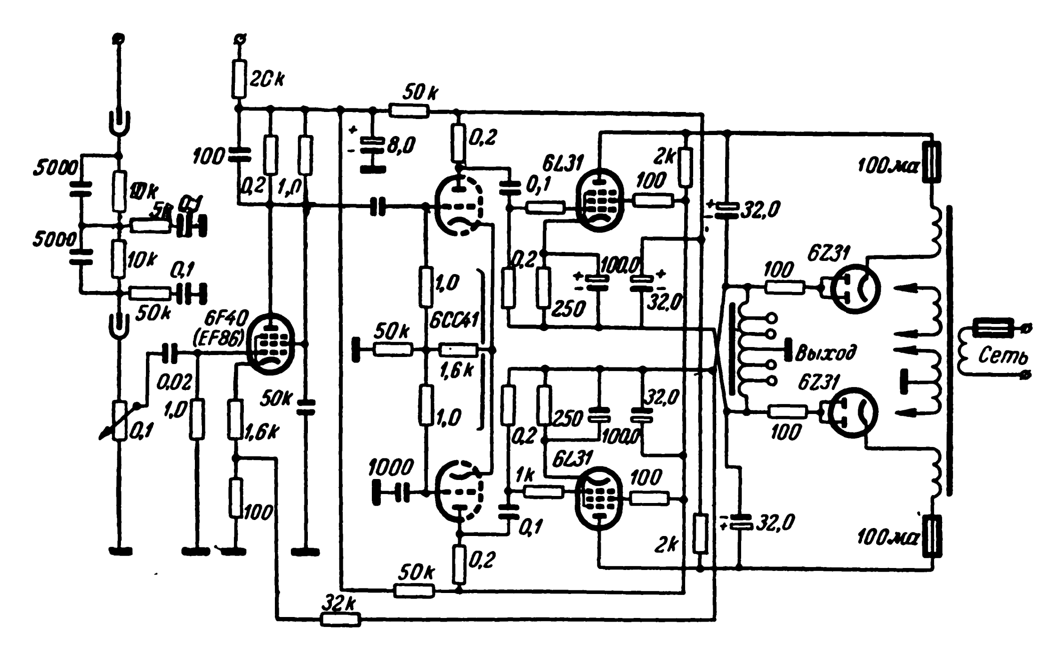


Рис. 69. Схема усилителя по принципу, показанному на рис. 67.

В настоящее время входные трансформаторы в двухтактных усилителях совершенно не применяются. Первые фазоинверторы для поворачивания фазы лампами были созданы по схеме, приведенной на рис. 70. Напряжение раскачки для фазоинверсной лампы получа-

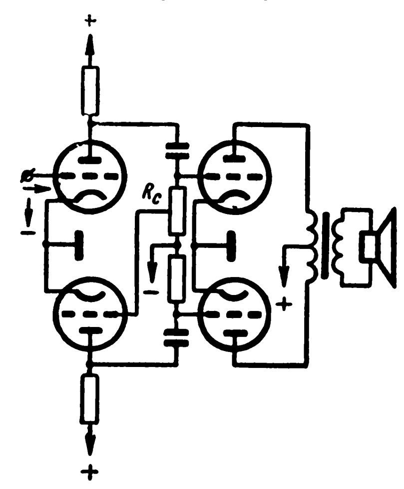


Рис. 70. Одна из первых схем фазоинвертора.

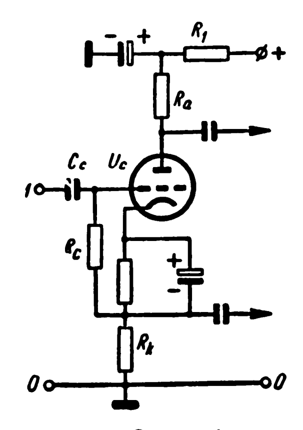


Рис. 71. Схема фазоинвертора с разделенной нагрузкой.

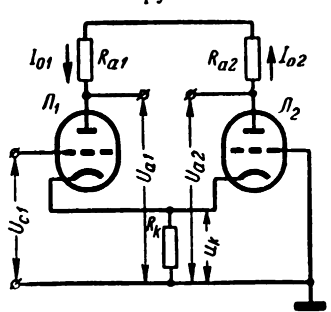


Рис. 72. Схема фазоинвертора с общим резистором в цепи катодов ламп (с катодной связью).

лось от утечки сетки R_c. Потенциометр регулировали так, чтобы на управляющих сетках обеих оконечных ламп было одинаковое переменное напряжение сигнала. Эта схема имеет тот недостаток, что, например, старение ламп могло бы вызвать неравномерность амплитуды сигналов, что в свою очередь вызвало бы искажения от несимметрии.

Этот случай побудил создать другую схему фазоинвертора (рис. 71). В нем применены два резистора, имеющие совершенно одинаковые сопротивления. Один из них (R_a) включен в анодную цепь, а другой ($R_к$) — в катодную цепь лампы, благодаря чему переменные напряжения на них находятся в противофазе. Так как через оба сопротивления протекает одинаковый ток (если речь идет о триоде), то симметрия зависит только от того, имеют ли оба резистора совершенно одинаковые сопротивления. Следует отметить, что при правильном выборе сопротивлений резисторов на симметрию не воздействуют ни тепло, ни длительность работы.

Другой фазоинвертор, обладающий весьма хорошими качествами, приведен на рис. 72. Схема его работает следующим образом. Если положительный полупериод подать на сетку лампы $Л_1$, то произойдет падение напряжения на анодном сопротивлении R_{a1}; на аноде лампы $Л_1$ напряжение уменьшится, а на катодном сопротивлении $R_к$ напряжение увеличится.

Лампа $Л_2$ включена как усилитель с заземленной сеткой. Это означает, что напряжение, возникающее на сопротивлении резистора $R_к$, подается на сетку лампы $Л_2$.

Так как напряжение на резисторе $R_к$ возрастает, то отрицательный потенциал на сетке лампы $Л_2$ тоже возрастает, что приводит к уменьшению анодного тока через лампу $Л_2$ и, следовательно, к увеличению напряжения на ее аноде, т. е. напряжение на аноде лампы будет в противофазе с напряжением на аноде лампы $Л_1$.

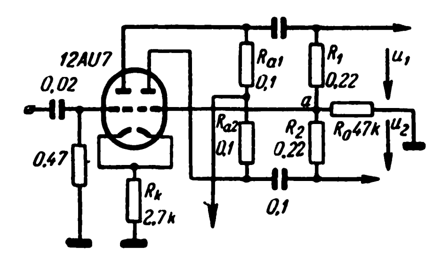


Рис. 73. Схема самобалансирующегося фазоинвертора.

Если желательно, чтобы $u_1 = u_2$, то сопротивления анодных резисторов не должны быть одинаковой величины.

Правильной работе фазоинвертора с катодной связью отвечает соотношение

$$R_{a1} = \frac{R_{a2}}{1 + \dfrac{R_{a2} + R_{i2}}{R_к(\mu_2 + 1)}},$$

где R_{i2} — внутреннее сопротивление лампы;

μ_2 — коэффициент усиления лампы, работающей как усилитель с заземленной сеткой.

Результатом дальнейшего развития фазоинверторов явилось создание самобалансирующегося фазоинвертора, схема которого приведена на рис. 73. Это улучшенный фазоинвертор с катодной связью Здесь подключены только резисторы R_1, R_2, R_0. Если два выходных напряжения одинаковы, то в точке a, как результат противоположных фаз и одинаковых сопротивлений резисторов R_1 и R_2, будет нулевое напряжение, и схема будет работать как обычный фазоинвертор с катодной связью. Если, например, на аноде лампы $Л_1$ оказалось бы напряжение большее, чем на аноде лампы $Л_2$, то через резистор R_0 прошел бы ток, возникший от мгновенной разности напряжений, и несимметрия напряжений исправилась бы сама собой.

Эта схема дает на практике симметричное напряжение, не зависящее от идентичности параметров ламп.

РЕГУЛЯТОР ГРОМКОСТИ

В усилительной цепи необходим еще и регулятор громкости. Его довольно часто заменяют включением потенциометра и считают эту проблему вполне решенной.

Если же рассмотреть регуляторы громкости поподробнее, то выяснится, что они достаточно капризны, а выявить их недостатки

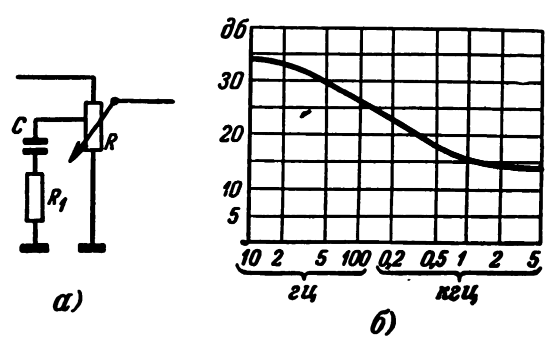


Рис. 74. Схема простого регулятора громкости (*а*) и его частотная характеристика (*б*).

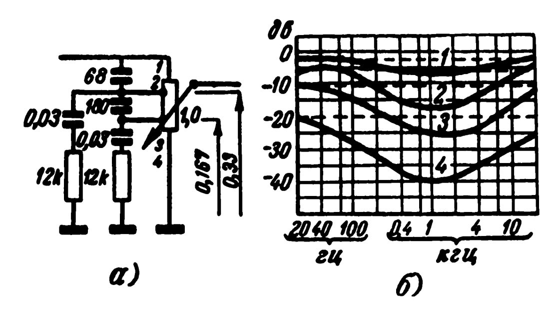


Рис. 75 Схема сложного регулятора громкости (*а*) и получаемые с ним частотные характеристики (*б*).

бывает довольно трудно. Причина этих осложнений заключается в нашем слуховом аппарате, восприятие которого зависит от частоты, но еще более от громкости звука. При включении в усилитель обыкновенного потенциометра возникает следующее: регулятор громкости (частотно-независимый) ослабляет весь диапазон частот одинаково.

При передаче частот ближе к низшим или высшим областям звукового спектра необходимы более сильные возбуждения для нашего уха, чтобы эти частоты воспринимались с той же громкостью, как и средний диапазон частот. Так как все частоты ослабляются

потенциометром равномерно, то получается, что снижение громкости на самых низких и самых высоких частотах оказывается большим, чем на средних.

Физиологический регулятор громкости должен больше ослаблять средние частоты, чем низкие и высокие.

Конструкций физиологических регуляторов разработано много; они могут быть и простыми и сложными и это естественно влияет на результаты их работы. Совершенные физиологические регуляторы громкости, точно соответствующие кривым одинаковой громкости, представляют собой довольно сложный узел. Иногда бывают достаточны и

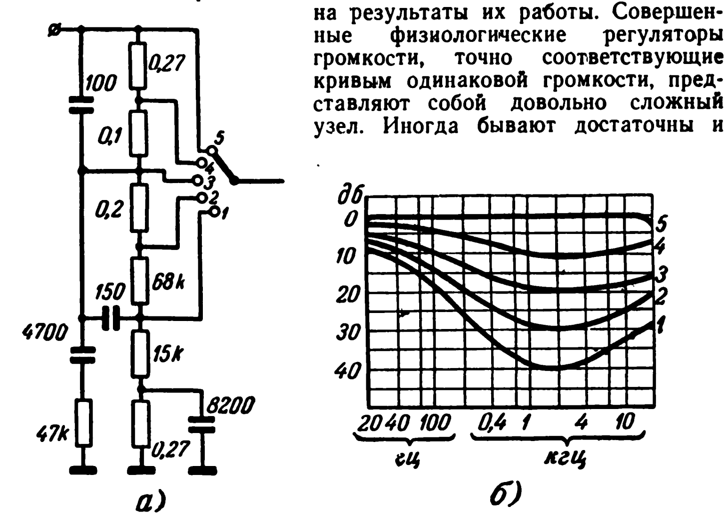


Рис. 76. Схема ступенчатого регулятора громкости (*а*) и его частотные характеристики (*б*).

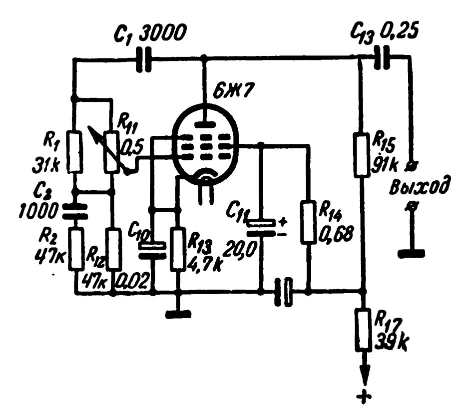


Рис. 77. Схема регулятора громкости с использованием отрицательной обратной связи.

менее совершенные регуляторы; применяются также и простые регуляторы, один из примеров которого приведен на рис. 74. Такой регулятор в настоящее время используется в приемниках.

На рис. 75 показана более совершенная схема регулятора, которая, исходя из соответствующих ей кривых, полностью соответствует физиологическим свойствам уха. К сожалению, потенциометры с двумя отводами встречаются редко. Недостаток потенциометров с отводами восполняют регуляторы, изменяющие громкость не плавно, а ступенями.

Схема такого регулятора и его частотные характеристики показаны на рис. 76.

Интересны регуляторы громкости, использующие отрицательную обратную связь (рис. 77). Здесь используются отрицательные частотно-зависимые обратные связи, идущие с анода через делитель $C_1R_1C_2R_2$ на управляющую сетку лампы. Если движок потенциометра R_{11} находится в нижнем (по схеме) положении, т. е. в положении минимальной громкости, то обратная связь будет максимальной. Величины элементов цепи обратной связи выбраны так, что если громкость на средних частотах уменьшится на 40 *дб* по сравнению со своей максимальной величиной, то частоты около 30 *гц* будут ослаблены на 20 *дб*. Наоборот, при верхнем положении движка потенциометра влияние обратной связи уменьшается и частотная характеристика выравнивается, т. е будет подобна кривым равной громкости.

РАЗДЕЛЬНОЕ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ ЗВУКА

Основная задача, которую поставило развитие низкочастотной техники, состоит в постоянном стремлении к расширению диапазона передаваемых частот, в результате чего воспроизведение звука приближается к натуральному звучанию. Поэтому скоро стало понятно, что одного громкоговорителя для воспроизведения самых низких и самых высоких частот недостаточно.

С физической же стороны существуют иногда прямо противоположные условия, удовлетворить которые бывает очень трудно. Так, например, для воспроизведения звуков очень низкой частоты требуется диффузор большой площади, с мягким подвесом, в то время как для воспроизведения звуков очень высоких частот, наоборот, необходим жестко подвешенный диффузор малых размеров. Поэтому передаваемый диапазон частот начали делить сначала на два, а затем на несколько поддиапазонов. Каждый поддиапазон передавался предназначенным для него громкоговорителем, громкость воспроизведения которого при надобности регулировалась. Это способ, так называемого раздельного воспроизведения, был следующим шагом к совершенному воспроизведению звука, особенно если это касалось передачи музыки.

В низкочастотной технике известны два способа раздельного воспроизведения. Эти два способа иллюстрируются блок-схемами на рис. 78. В первом случае (рис. 78,*а*) передаваемая полоса частот подается на один усилитель и разделение на низкие и высокие частоты происходит на выходе усилителя обычно после выходного трансформатора. В другом случае (рис 78,*б*) для каждого поддиапазона частот необходим специальный усилитель со своим громко-

говорителем, который усиливает только высокие или только низкие частоты, т. е. необходим двухканальный усилитель. Этот способ был наиболее распространен до тех пор, пока не имелось возможностей создавать оконечные каскады, дающие возможность передавать требуемый широкий диапазон частот в целом.

В настоящее время, когда имеются простые способы создания усилителя с диапазоном частот от 30 до 20 000 *гц* и более, двухканальное воспроизведение становится дорогим, так как при этом необходимо изготовить два усилителя.

Проблема раздельного воспроизведения всего диапазона частот состоит в расчете разделяющего фильтра. Существует несколько типов разделяющих фильтров. Для разделения всего диапазона частот на две полосы применяются фильтры верхних и нижних частот, для разделения на три полосы применяют еще фильтр средних частот. Основное условие хорошего раздельного воспроизведения состоит в том, чтобы каждая отдельная полоса частот была строго отделена от другой. Кроме того, разделяющие фильтры должны иметь частотные характеристики с достаточно крутыми спадами в зоне частоты разделения $f_{разд}$. И, наконец, имеет значение и сам выбор частоты разделения, которая должна находиться в пределах от 400 до 1 200 *гц*, а лучше, если она будет равняться 600 *гц*. Кроме того, необходимо предусмотреть, чтобы громкоговоритель низких частот передавал частоты точно на пол-октавы выше, а громкоговоритель для высоких частот — на пол-октавы ниже частоты разделения $f_{разд}$. Громкоговорители необходимо фазировать, т. е. при одинаковой фазе сигнала их диффузоры должны отклоняться в одну сторону.

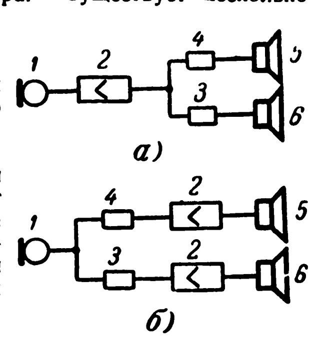


Рис. 78. Блок-схемы разделения спектра звуковых частот на высокие и низкие частоты.

а — после усилителя; *б* — до усилителя. (*1* — микрофоны; *2* — усилители; *3* — фильтры высоких частот; *4* — то же низких частот; *5* — громкоговорители для воспроизведения низких частот; *6* — то же высоких частот).

Правильное фазирование может быть достигнуто при помощи батареи. Присоединив батарею произвольно к катушке громкоговорителя, определяют направление отклонения диффузора (втягивание или выталкивание звуковой катушки).

Обозначив вывод катушки знаком «+», к которому был присоединен положительный полюс, батареи присоединяют ее к катушке другого громкоговорителя. Если диффузор отклонится в том же направлении, что и у первого громкоговорителя, тогда также отмечается вывод катушки знаком «+», присоединенный к положительному полюсу батареи.

При последующем подключении громкоговорителей присоединяют одинаково отмеченные выводы подвижных катушек к соответствующим выводам выходного трансформатора.

На практике применяют фильтры с затуханием в области $f_{разд}$ в 6 *дб/окт*, 12 *дб/окт* и 18 *дб/окт*. Особенно большие требования предъявляют к раздельному воспроизведению в стереофонии, так

как здесь необходимо чрезвычайно точное разграничение передаваемых частот. В противном случае вся система окажется непригодной. Отдельные разделяющие фильтры можно включать как последовательно, так и параллельно, при этом следует только избегать их влияния друг на друга.

Схема простейшего фильтра с незначительным затуханием в области $f_{разд}$ и с неярко выраженной частотой разделения показана на рис. 79. Конденсатор служит для разделения частоты; его емкость влияет на частоту $f_{разд}$. Чем меньше емкость конденсатора, тем выше частота разделения. На практике применяют конденсаторы емкостью до 4 *мкф*. Одновременно с требованием к величинам затухания растет и число используемых элементов в фильтре. На рис. 80 показаны схемы включения многозвенных разделяющих фильтров для высококачественного воспроизведения звука, позволяющих получать затухание до 12 *дб/окт*.

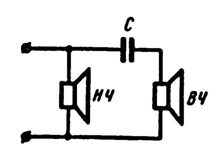
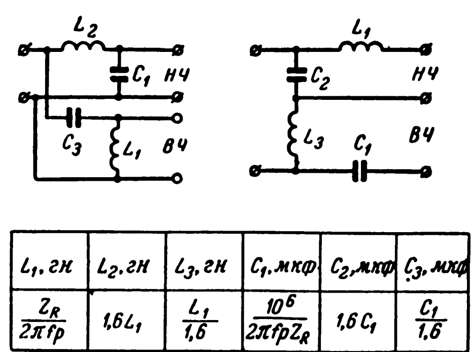


Рис. 79. Простейший фильтр для разделения частот.

Разделительные фильтры для громкоговорителей с затуханием до 18 *дб/окт* используются довольно редко.

При практическом выполнении фильтров необходимо помнить, что избирательность их зависит от качества используемых конденсаторов и катушек индуктивности. Поэтому вплоть до емкости 4 *мкф*, применяют бумажные конденсаторы; выше этой емкости применяют так называемые биполярные электролитические конденсаторы, представляющие собой два обычных электролитических кон-



L_1, *гн*	L_2, *гн*	L_3, *гн*	C_1, *мкф*	C_2, *мкф*	C_3, *мкф*
$\frac{Z_R}{2\pi f_p}$	$1{,}6L_1$	$\frac{L_1}{1{,}6}$	$\frac{10^6}{2\pi f_p Z_R}$	$1{,}6C_1$	$\frac{C_1}{1{,}6}$

Рис. 80. Многозвенные фильтры для разделения частот.

денсатора, соединенных так, как показано на рис. 81. Необходимо помнить о значительном допуске на номинальные емкости электролитических конденсаторов, следует проверить емкость каждого конденсатора перед включением его в фильтр.

Следующий недостаток электролитических конденсаторов — возрастание с частотой реактивного сопротивления — устраняется па-

раллельным присоединением к ним бумажных конденсаторов емкостью 0,8—1,0 *мкф*.

Катушки индуктивности для фильтров следует применять по возможности без сердечников, а сечение провода для них выбирать таким, чтобы потери в обмотках достигали не более 10%. Так как катушки без сердечников требуют большого количества витков, то можно применять альсиферовые или ферритовые, а в редких случаях и железные сердечники с воздушным зазором. При использовании железных сердечников необходимо следить, чтобы магнитная

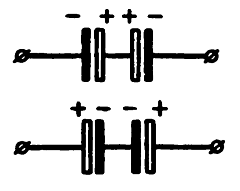


Рис. 81. Схемы соединений биполярных электролитических конденсаторов.

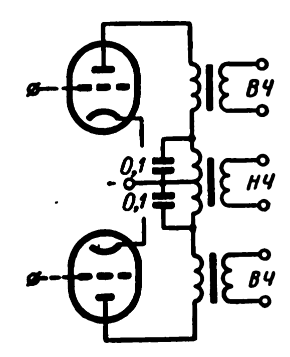


Рис. 82. Схема выходного двухтактного каскада с тремя выходными трансформаторами.

индукция не превышала допустимую величину, так как в противном случае проницаемость железа будет зависеть от частоты и амплитуды колебаний.

Кроме способов, приведенных выше, существует (особенно за границей) ряд интересных решений раздельного воспроизведения. На рис. 82 показана схема двухтактного выходного каскада, в котором применены два выходных трансформатора для громкоговорителей высоких частот и один трансформатор — для низких. Схема работает для низких частот как двухтактная с удвоенной мощностью, а для высоких частот каждая лампа работает как самостоятельный однотактный оконечный каскад. Очевидно, что ее работа возможна только в режиме А, а громкоговорители высоких частот должны иметь противофазное включение.

На рис. 83 показана схема высококачественного двухканального оконечного каскада, примененная в одном из приемников фирмы Филипс. Разделяющий фильтр состоит из *RC*-звеньев.

В заключение главы о раздельном воспроизведении необходимо напомнить еще об одном свойстве этого воспроизведения. Из практики известно, что если поставить два или больше громкоговорителей для воспроизведения одного и того же диапазона частот, то субъективное впечатление о передаваемой музыке становится более окрашенным и пространственным. Разделение воспроизведения усиливает это достоинство. Однако не следует путать раздельное воспроизведение и стереофонию, так как они представляют собой совершенно различные и несравнимые способы воспроизведения звука.

СТЕРЕОФОНИЯ

В настоящее время стереофония представляет собой последнее достижение низкочастотной техники на пути к наиболее высококачественному воспроизведению звука. Физиология стереофонического слушания была кратко объяснена в одном из параграфов книги. Теперь же будут приведены технические способы стереофонического воспроизведения.

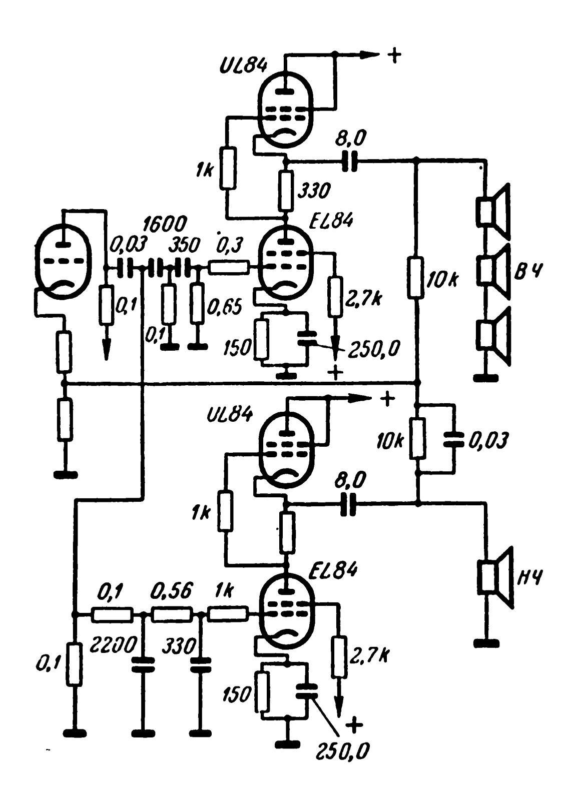


Рис. 83. Схема двухканального оконечного каскада для высококачественного воспроизведения звука.

Еще на заре развития стереофонии было известно, что для стереофонического слушания недостаточно одного канала воспроизведения: чем большим было число каналов, тем лучше была стереофоническая передача. Однако с увеличением числа каналов стоимость аппаратуры увеличивается. Поэтому при создании стереофонической аппаратуры выбирались такие конструкции, когда при ми-

нимальном числе каналов можно было удовлетворить требованиям стереофонического воспроизведения.

В настоящее время, особенно в граммофонной технике, достаточно распространены устройства с двухканальной системой воспроизведения.

Многоканальные системы применяют в кинематографии, где они служат главным образом для передачи звуковых эффектов и т. п.

Основные трудности возникают при создании записывающей аппаратуры для случаев близкого расположения источника звука; в то время, как при воспроизведении все проблемы достаточно хорошо решены.

В настоящее время известны два основных способа двухканальной стереофонии, которые полностью или почти полностью отвечают современным требованиям, предъявляемым к пространственному воспроизведению.

Первый — запись при помощи двух ненаправленных микрофонов, размещенных на большом расстоянии друг от друга (от 2 до 10 *м*), что позволяет определить правильное расположение источника звука, особенно, если он находится ближе к одному из микрофонов В пространстве между микрофонами, однако, возможность ориентации при этом уменьшается.

Другой способ — так называемый способ акустического разделения микрофонов (искусственная голова). Он заключается в том, что на искусственной голове, сделанной из дерева или какого-либо иного звукоизоляционного материала, вместо ушей укрепляют два микрофона. Эту голову устанавливают перед оркестром на таком расстоянии, чтобы угол слухового восприятия составлял от 30° до 45°. Было замечено, что форма головы мало влияет на результаты записи. Поэтому в настоящее время пользуются двумя ненаправленными микрофонами, расположенными на расстоянии 20 *см* один от другого и разделенными прямоугольной перегородкой из звукопоглощающего материала. Сигналы с микрофонов через отдельные усилители подаются к телефонным трубкам. При этом правый микрофон передает сигналы к правой трубке, а левый — к левой.

Если предположить, что канал передачи хорошего качества, то этот способ передачи звука будет самым совершенным и влияние факторов, искажающих звук, в данном случае будет полностью устранено.

Основной недостаток такой стереофонической передачи заключается в неудобстве прослушивания через телефонные трубки и тем самым ограничение числа слушателей. Поэтому стали изыскивать пути использования громкоговорителей. Так, телефонные трубки были заменены громкоговорителями. Несмотря на то, что основные принципы бинаурального слышания были сохранены, этот способ по качеству несколько хуже, чем способ разнесенных микрофонов, так как в этом случае нельзя создать преграду нежелательным звукам (от источника звука, расположенного справа — к левому уху, и наоборот).

Отсюда вытекает, что технически самым совершенным все-таки остается способ использования телефонных трубок. Еще одно преимущество телефонных трубок состоит в том, что при повороте головы направление передаваемого сигнала не изменяется, так как вместе со слушателем поворачиваются и трубки, укрепленные на голове.

Несмотря на достигнутые результаты, в настоящее время ни один из рассмотренных способов не применяется в основном по чисто техническим соображениям.

Для большего распространения стереофонического способа воспроизведения звука через новейшие граммофонные стереофонические проигрыватели можно прослушивать также и обычные (монофонические) граммофонные пластинки.

Учитывая всё это, был выбран другой, менее высококачественный, но и менее дорогостоящий, способ, называемый интенсивной стереофонией.

Рис. 84. Схема включения микрофонов при стереофонической передаче звука.

Как подсказывает само название «интенсивная стереофония» — в этом способе перенос объемной информации осуществляется только при помощи разделения интенсивности по двум каналам. Остальные причины направленного слышания — разница времени и фазы — умышленно отбрасываются, так как только при этих условиях возможна совместимость. Условия совместимости необходимо соблюсти уже при снятии звука. Микрофоны должны быть размещены так, чтобы они отвечали требованиям стереофонической записи, однако они одновременно должны отвечать и требованиям монофонического слушания. Затруднение состоит в том, что оптимальное размещение микрофонов для способа интенсивной стереофонии не совпадает с оптимальным размещением при монофонической (обыкновенной) записи.

Наиболее распространенным видом снимания звука в интенсивной стереофонии получил распространение способ, при котором используют два микрофона, точно расположенных друг над другом на одной стойке, которую устанавливают перед оркестром. Первый микрофон, называемый тоновым и имеющий кардиоидную характеристику направленности, обращен своей чувствительной частью к середине оркестра. Имея хорошую пространственную чувствительность, он воспринимает звуки всего оркестра и служит как для стереофонической, так и для монофонической передачи.

Другой микрофон имеет восьмерочную характеристику направленности. Он наиболее чувствителен к левой и правой частям оркестра, таким образом сигналы от этого микрофона только дополняют сигналы первого.

Чтобы из этих двух сигналов выделить только те, которые предназначены для обоих громкоговорителей, необходимо, чтобы оба разделенных сигнала были вновь смешаны при помощи специальной схемы.

На рис. 84 приведена схема для совмещения электрических сигналов при помощи двух трансформаторов. На рис. 85 показано расположение оркестра и характеристики направленности микрофонов при записи звуков. Для упрощения предположим, что звуки будут

восприниматься из трех мест, обозначенных точками *1, 2, 3*. Чтобы облегчить объяснения, будем считать, что звуковые колебания имеют только строго синусоидальную форму. Если звук от источника, находящегося в точке *1*, будет восприниматься микрофоном с кардиоидной характеристикой, то он преобразуется в некоторый электрический сигнал. Микрофон с восьмерочной характеристикой также воспримет этот сигнал и преобразует его в электрический сигнал, напряжение которого будет соответствовать чувствительности микрофона в направлении к точке *1*, в той же фазе, что и кардиоидный микрофон.

Если обратиться снова к рис. 84, то увидим, что через оба трансформатора протекут два независимых тока. Так как оба тока находятся в одинаковой фазе, то в трансформаторе левого канала они будут складываться, а в трансформаторе правого канала — вычитаться. Таким образом, в левом канале сигнал будет больше, чем в правом, и, если правильно разместить громкоговорители, будет возможно определить направление проходящего звука.

Если переместить источник звука в точку *2* (рис. 85), то положение будет аналогично рассмотренному с той лишь разницей, что фаза сигнала восьмерочного микрофона будет повернута на 180°.

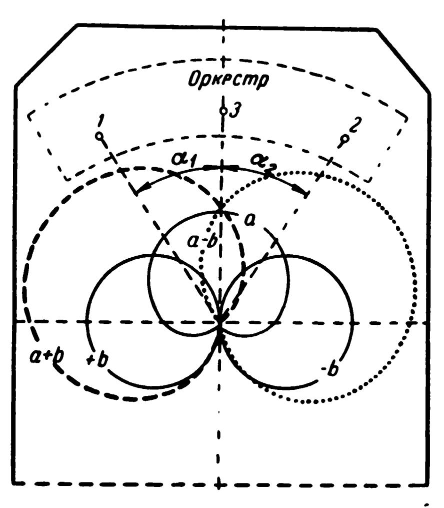


Рис. 85. Расположение оркестра и характеристики направленности микрофонов при стереофонической передаче звука.

Если рассмотреть опять схему совмещения сигналов, то будет ясно, что в трансформаторы опять потекут два независимых тока, но на этот раз уже так, что в трансформаторе левого канала фазы будут вычитаться, а в трансформаторе правого канала, наоборот,— складываться.

Таким путем, более громкий звук будет получаться в правом громкоговорителе, и слушатели будут слышать звук, приходящий с правой стороны. Если звук приходит из точки *3*, то он будет восприниматься только кардиоидным микрофоном, наиболее чувствительным в этом направлении, в то время как восьмерочный микрофон не будет добавлять никакого сигнала. В этом случае через оба трансформатора будет протекать единый поток, а из обоих громкоговорителей будет слышан звук одинаковой силы. Будет впечатление, что звук приходит из центра.

Если же воспроизводить запись, передаваемую только кардиоидным микрофоном, то получится достаточно высококачественное монофоническое воспроизведение.

При стереофоническом воспроизведении громкоговорители находятся на расстоянии до 2,5 *м* друг от друга и должны быть направлены к центру помещения. Однако решающим фактором в данном вопросе могут быть лишь результаты испытаний в местных условиях, которые и подскажут наиболее правильное размещение громкоговорителей.

ЗАПИСЬ ЗВУКА

Человек издавна стремился записать окружающие его звуки. Однако прошло немало времени и надо было разрешить много технических проблем, прежде, чем первому счастливцу удалось услышать воспроизведенный человеческий голос. От этого первого опыта нас отделяет уже несколько десятилетий. Из известных в настоящее время способов записи рассмотрим здесь два: электромеханический и магнитный.

ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ СПОСОБ ЗАПИСИ ЗВУКА

Весьма совершенный в настоящее время электромеханический способ записи звука на граммофонную пластинку получил быстрое развитие, особенно в годы между двумя мировыми войнами, когда собственно он и сформировался.

В годы после второй мировой войны развитие этого способа продолжалось и в результате многочисленных работ были созданы долгоиграющие и стереофонические пластинки. Если на первый взгляд кажется, что этот способ получил какое-то свое завершение, то на самом деле его развитие позволяет ожидать и дальнейшего улучшения качества электромеханической записи звука. Известны два способа записи, при помощи которых звуковые сигналы наносятся на пластинку: глубинная запись, когда резец двигается синхронно с записываемым сигналом перпендикулярно пластинке, и поперечная запись, когда резец совершает колебания в направлении радиуса пластинки. В настоящее время применяется способ исключительно поперечной записи.

Для записи на грампластинках обычно применяют магнитный или электродинамический рекордер. Резец укрепляют на подвижном железном якоре или на подвижной катушке. Скорость колебания его острия в нейтральной точке пропорциональна интенсивности записываемого сигнала. Следовательно, при постоянном напряжении скорость также постоянна, а амплитуда канавки обратно пропорциональна частоте сигнала. Такая запись называется записью с «постоянной скоростью».

Если амплитуда при записи высоких частот была выбрана какой-то определенной величины для получения приемлемого отношения сигнал/шум, то амплитуда при записи низких частот становится чрезмерной, поэтому нужно увеличивать расстояние между канавками, чтобы они не соприкасались. Следовательно, необходимо уменьшить амплитуду резца при записи низких частот, снизив для этого напряжение низких частот, подаваемых на рекордер. Для этой цели все низкие частоты от 50 до 300—500 *гц* записываются с постоянством амплитуды.

Так как трудно поддержать удовлетворительное отношение сигнал/шум на высоких частотах при записи с постоянной скоростью, то приходится предварительно поднимать высокие частоты в усилителе записи. Характеристику записи, т. е. кривую, представляющую собой зависимость напряжения усилителя записи от частоты, можно разделить на три участка: участок низких частот, напряжение которых ослаблено; участок средних частот, которые записываются с постоянной скоростью, и, наконец, участок высоких частот, напряжение которых усилено.

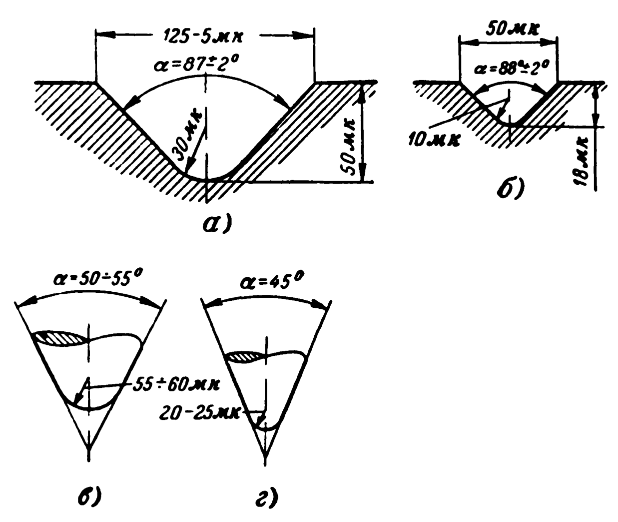


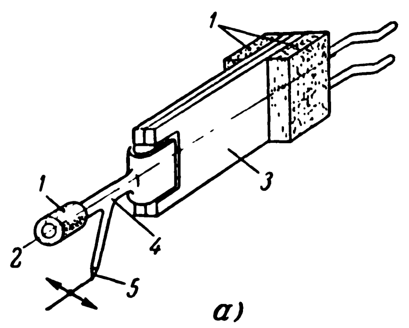
Рис. 86. Профили дорожек грампластинок и игл для них.

а — широкодорожечная; *б* — узкодорожечная; *в* — игла для широкодорожечной пластинки; *г* — то же для узкодорожечной.

В настоящее время выпускается шесть видов граммофонных пластинок: нормальные с широкой дорожкой на 78 *об/мин* диаметром 300—250 *мм*, долгоиграющие с узкой дорожкой на 45 *об/мин* диаметром 170 *мм* и на $33^1/_3$ *об/мин* диаметром 250 и 300 *мм*. В последнее время начался выпуск пластинок на $16^1/_2$ *об/мин* для словесной и музыкальной записи более низкого качества.

Разница профиля широкой и узкой дорожки показана на рис. 86. На рисунке указаны также размеры иглы звукоснимателя. При широкодорожечной записи на 1 *мм* наносятся четыре дорожки, а при узкодорожечной записи — 10 дорожек. Диапазон частот пластинок на 78 *об/мин* колеблется в интервале 60—7 000 *гц* при динамическом диапазоне 30 *дб*. У долгоиграющих пластинок на $33^1/_3$ *об/мин* диапазон частот увеличен и составляет 40—12 000 *гц*, а динамический диапазон достигает 40 *дб*. Наилучшим качеством обладают пластинки на 45 *об/мин*, имеющие диапазон частот 40—12 000 *гц* при динамическом диапазоне 45 *дб*.

Воспроизводят звук при помощи звукоснимателя. В настоящее время наиболее распространены пьезоэлектрические (кристаллические) и электромагнитные звукосниматели. Из них наиболее часто применяются кристаллические звукосниматели, так как их частотная характеристика наиболее близка к обратной (зеркальной) частотной характеристике записи звука. Поэтому кристаллические звукосниматели по сравнению с другими типами требуют сравнительно малой регулировки.



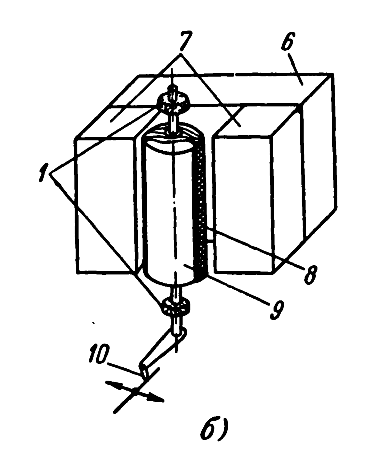


Рис. 87 Конструкции звукоснимателей.

а — пьезоэлектрический (кристаллический); *б* — электромагнитный (*1* — амортизирующий материал; *2* — ось кручения элемента; *3* — биморфный кристалл; *4* — подвижная часть; *5* — игла; *6* — магнит; *7* — полюсные наконечники; *8* — катушка; *9* — сердечник катушки; *10* — игла).

Иглы, снимающие звук, могут быть стальными для проигрывания только одной стороны пластинки или изготовлены из сапфира и предназначены для многократного проигрывания. Сапфировые иглы требуют очень осторожного обращения, так как весьма чувствительны, легко портятся. Проигрывание же испорченной иглой ведет не только к сильному искажению воспроизведения, но и к порче тонкой дорожки записи, что приводит пластинку в полную негодность. Одновременно надо следить при проигрывании грампластинок звукоснимателями с переключающимися иглами, чтобы игла соответствовала виду пластинки. При правильном и бережном обращении долгоиграющая игла выдерживает 2 000—3 000 проигрываний для широкодорожечных пластинок и около 1 000 проигрываний для долгоиграющих. Конструкции разных типов звукоснимателей показаны на рис. 87.

Кристаллический звукосниматель (рис. 87,*а*) состоит из биморфного кристалла из сегнетовой соли и иглодержателя. Игла, следуя за изгибами дорожки граммофонной записи, деформирует кристалл-двойник, что в свою очередь создает на его обкладках напряжение, пропорциональное отклонению иглы.

У электромагнитных звукоснимателей между полюсами магнита находится подвижный сердечник, соединенный с иглой. Движение иглы отклоняет якорь к одному или другому полюсу магнита, благодаря чему в катушке наводится переменное напряжение, пропор-

циональное ее скорости. Аналогично устроены и электродинамические звукосниматели (рис. 87,б). Разница состоит лишь в том, что в магнитном поле передвигается катушка, соединенная с иглой. Переменное напряжение возникает так же, как и в электромагнитных звукоснимателях.

Несмотря на одинаковый принцип действия, звукосниматели для воспроизведения стереофонической записи имеют иную конструкцию. Отличие их прежде всего состоит в том, что запись и воспроизведение звука производятся одновременно по двум (левому и правому каналам).

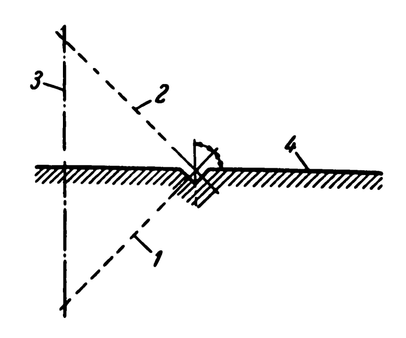


Рис. 88. Принцип записи по методу 45/45.

1 — движение резца при записи левого канала; 2 — то же правого канала; 3 — ось вращения пластинки; 4—пластинки.

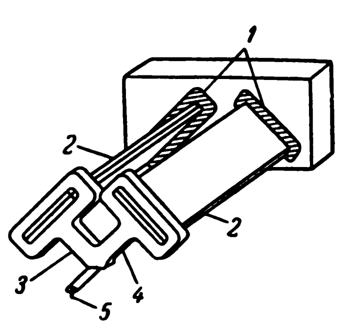


Рис. 89. Конструкция пьезоэлектрического стереофонического звукоснимателя.

1 — амортизирующий материал; 2 — биморфные кристаллы; 3 — V-образная деталь для соединения кристаллов; 4 — иглодержатель; 5 — игла.

В стереофонии наиболее известны два способа записи. По первому способу применяют глубинную (вертикальную) запись для одного канала и поперечную — для другого. Такой способ записи обозначают 0/90. Однако уже на первых порах стало ясно, что этот способ невыгоден, так как качество записи каждого канала было различно (вертикальный способ записи давал худший результат по сравнению с поперечным способом). Второй способ записи — по методу 45/45 (рис. 88). При этом способе запись обоих каналов не отличается по качеству, так как в обоих случаях запись производится под углом 45°.

На этом принципе основана конструкция стереофонического звукоснимателя, приведенная на рис. 89.

МАГНИТНЫЙ СПОСОБ ЗАПИСИ ЗВУКА

Магнитная система записи звука в последнее время находит все более широкое применение. К ее достоинствам следует отнести широкий частотный и динамический диапазон, длительный срок службы записей, большое время непрерывного звучания, легкость монтажа и возможность исключения из ленты нежелательных ча-

стей записи, дешевизна носителя записи и возможность его многократного использования.

Магнитный способ записи состоит в том, что подлежащий записи электрический сигнал подводится к записывающей магнитной головке. Носитель записи (магнитофонная лента с нанесенным на ее поверхность ферромагнитным материалом) перемещается относительно зазора магнитной головки. Магнитная головка представляет собой магнитопровод с обмоткой, в которой протекает ток приходящих сигналов При воспроизведении лента с намагниченным слоем перемещается относительно зазора воспроизводящей головки и наводит переменное напряжение в ее катушке, соответствующее записанному сигналу.

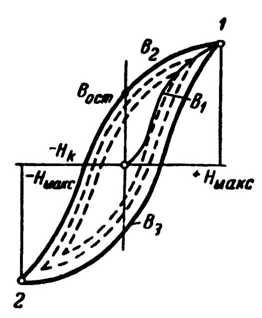


Рис. 90. Гистерезисная кривая (петля).

Для того чтобы лучше понять магнитный способ записи звука, рассмотрим поведение ферромагнитного материала в переменном магнитном поле. Как известно, если внести кусок из ферромагнитного материала в магнитное поле, он намагничивается и напряженность в нем магнитного поля B, называемая магнитной индукцией, отличается от напряженности внешнего магнитного поля H. Кривая зависимости B от H называется кривой намагничивания или гистерезисной кривой (рис. 90). В отсутствии магнитного поля ($H=0$) магнитная индукция в ферромагнитном материале равна 0. С увеличением магнитного поля H магнитная индукция B растет. Изменение B с H описывается кривой B_1 на рис. 90, называемой основной кривой. При некоторой напряженности магнитного поля $+H_{макс}$ кривая достигает точки *1*. Если затем напряженность магнитного поля начнет уменьшаться, то магнитная индукция уменьшается не по кривой B_1, а по кривой B_2, и при $H=0$ становится равной величине $B_{ост}$, называемой остаточной намагниченностью. Для уничтожения остаточной намагниченности нужно поместить ферромагнитиый материал в магнитное поле напряженности $-H_к$. Напряженность внешнего магнитного поля $H_к$, при которой снимается остаточная намагниченность ферромагнитного материала, называется коэрцитивной силой. Ее величина важна при стирании записи с магнитофонной ленты. При значении $-H_{макс}$ кривая B_2 достигает точки *2*; при увеличении H от $-H_{макс}$ до $+H_{макс}$ магнитная индукция изменяется по кривой B_3. Каждому значению напряженности магнитного поля $H_{макс}$ соответствует своя гистерезисная кривая (петля). Так, на рис. 90 пунктиром показаны кривые для двух меньших величин $H_{макс}$.

В магнитной записи решающее значение имеет остаточное намагничивание. Зависимость остаточного намагничивания от напряженности магнитного поля достаточно ясна уже из гистерезисной кривой, поэтому перейдем к рассмотрению кривой, называемой динамической, которая характеризует качество магнитофонной ленты. Эту характеристику в некотором смысле можно уподобить сеточной характеристике лампы $I_а=f(U_c)$.

Так как при любой записи для избежания нелинейных искажений стремятся использовать только линейные зависимости, то это правило распространяется и на магнитную запись. Однако динамическая характеристика, особенно в начале хода, далеко не линейна, что дает в результате сильно искаженный сигнал (рис. 91). Это происходит в случае намагничивания магнитно-нейтрального материала.

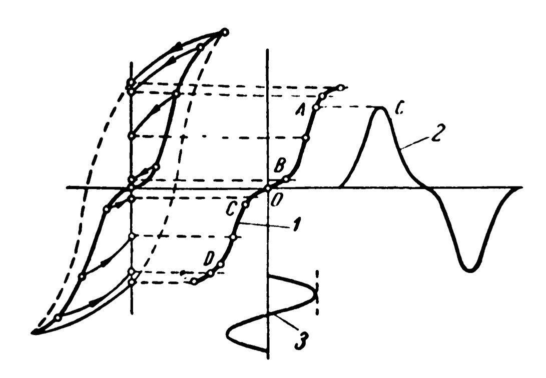


Рис. 91. Искажение сигнала при записи без подмагничивания.

1 — динамическая характеристика; *2* — искаженный сигнал; *3* — ток записываемого сигнала.

На рис. 92 приведен пример использования магнитонасыщенного материала. В этом случае сигнал совершенно не пригоден для дальнейшего использования. После внимательного рассмотрения динамической характеристики становится ясно, что хорошие результаты возможны только в том случае, если магнитной ленте дать какое-либо предварительное магнитное напряжение (смещение), которое бы передвинуло запись в область линейной части динамической характеристики. На практике это достигается предварительным подмагничиванием.

Сначала применялось подмагничивание постоянным током так, что при записи лента намагничивалась не только записываемым сигналом, но и постоянным током, что передвигало запись на прямолинейную область динамической характеристики. Постоянное подмагничивание позволило производить менее искаженную запись, однако внесло в запись, как результат влияния неоднородности материала активного слоя, нежелательный шум, значительно ограничивший динамический диапазон.

Значительное улучшение качества записи принесло применение высокочастотного подмагничивания и высокочастотное стирание записи (рис. 93). Частоту стирающего и подмагничивающего сигнала выбирают, в зависимости от скорости движения ленты, в диапазоне 30—100 *кгц*; для больших скоростей используются частоты порядка 100 *кгц*, при скоростях от 9,5 до 19,5 *см/сек* выбирают частоты порядка 40—50 *кгц*. Амплитуду сигнала подмагничивания

выбирают такой, чтобы получить наименьшие нелинейные искажения при записи.

Амплитуда стирающего потока выбирается такой, чтобы при использовании стирающей головки происходило полное стирание

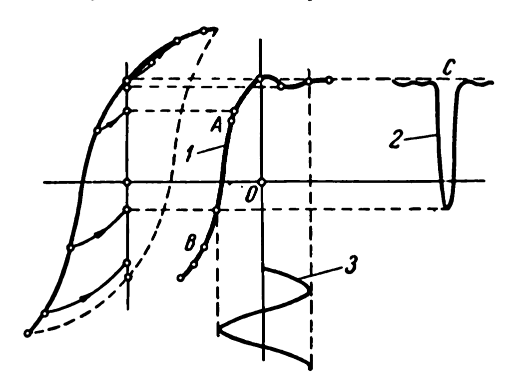


Рис. 92. Искажение сигнала при магнитном насыщении материала.

1 — динамическая характеристика; 2 — искаженный сигнал; 3 — ток записываемого сигнала.

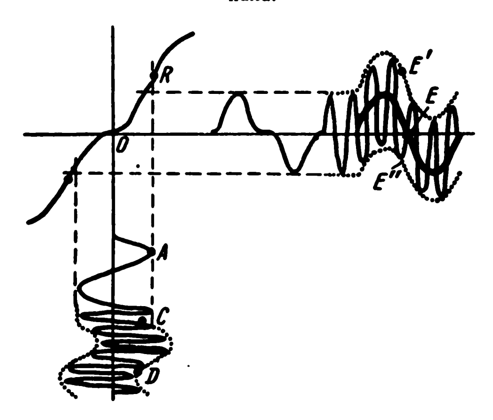


Рис. 93. Запись сигнала с применением высокочастотного подмагничивания.

записи. Необходимо следить, чтобы нагрев стирающей головки (для избежания деформации ленты) не превосходил допустимый. Следующим звеном, от которого в большой степени зависит качество магнитной записи — магнитная головка.

Принципиально все три процесса (запись, воспроизведение и стирание) можно осуществить одной магнитной головкой, однако

на практике при студийной записи применяют отдельные головки (записи воспроизведения, стирания). Лишь у наиболее простых магнитофонов функции записи и воспроизведения совмещены в одной головке, называемой универсальной.

На рис. 94 показаны четыре конструкции магнитофонных головок. Сердечник магнитной головки изготовляют из магнито-мягкого материала с большой начальной магнитной проницаемостью (обычно пермаллой, мюметалл и т. п.).

После сборки сердечник подвергают обработке при критических температурах в атмосфере водорода, после которой всякие механические воздействия на сердечник исключаются, так как малейший изгиб, разрезание или распиливание может в дальнейшем ухудшить его магнитные качества. В зазор магнитной головки вставляется фольга из бериллиевой меди или из бронзы. В некоторых случаях используются ферритовые сердечники.

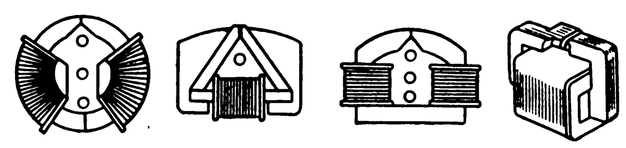


Рис. 94. Конструкции магнитных головок.

Срабатывание магнитных головок зависит от их качества, от качества ленты и скорости ее движения. Примерный срок службы магнитофонных головок при скорости 76,2 *см/сек* составляет около 500—1 000 *ч*. При меньших скоростях срок службы головок резко возрастает.

Ферритовые сердечники дают возможность увеличить срок службы магнитных головок приблизительно в 10 раз по сравнению с головками, имеющими сердечник из пермаллоя.

Конструктивно наиболее проста стирающая головка. Ширина зазора ее сердечника больше, чем у записывающей и воспроизводящей головок и колеблется в пределах 0,2—0,5 *мм*.

Записывающие головки более сложны. Для избежания нелинейных искажений сердечник записывающей головки не должен работать в области насыщения, поэтому в нем необходим дополнительный задний зазор.

Записывающие головки могут быть как низко-, так и высокоомными. Учитывая зависимость полного сопротивления головки от ее индуктивности, необходимо стремиться, насколько это возможно, к наименьшей индуктивности. Необходимо помнить также, что с увеличением количества витков возрастает емкость обмотки, которая шунтирует обмотку при высокочастотном подмагничивании.

Наибольшие требования предъявляются к воспроизводящей головке. Для передачи высоких частот ее зазор должен быть как можно меньше. При условии

$$f \geqslant \frac{v}{d_з},$$

(где v — скорость движения ленты; $d_з$ — ширина зазора), напряжение в воспроизводящей головке индуцироваться вообще не может.

Поэтому для повышения верхней границы частот воспроизведения необходимо либо уменьшить ширину зазора воспроизводящей головки, либо увеличивать скорость движения ленты.

Сердечник воспроизводящей головки должен обладать незначительной остаточной намагниченностью.

Весьма сложную проблему представляет защита магнитной головки от мешающих магнитных полей. Для этого применяют экранирование, иногда двойное, или включают так называемые компенсационные катушки последовательно с головкой так, чтобы наводимое в ней напряжение было в противофазе с напряжением помехи, наводимым в воспроизводящей головке. Правильная намотка и размещение компенсационной катушки приводит к значительному снижению помех.

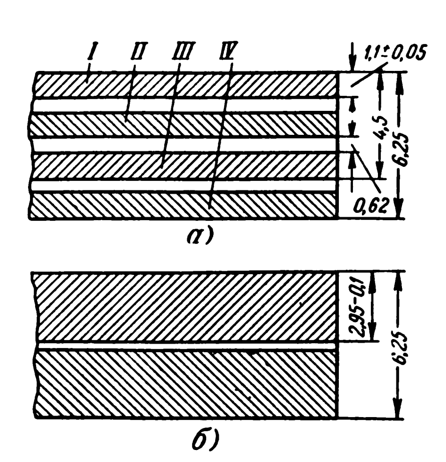


Рис. 95. Основные размеры магнитной ленты и звуковых дорожек.

а — с четырьмя дорожками; *б* — то же с двумя дорожками.

Комбинированная головка в какой-то степени представляет собой компромиссное объединение записывающей и воспроизводящей головок; однако она требует более частого размагничивания. После работы универсальной головки в качестве записывающей в ней остается незначительный остаточный магнетизм, который при воспроизведении становится причиной шума.

Кроме разделения головок по роду работы, их еще подразделяют и по применению: для одно-, двух- и четырехдорожечной записи и воспроизведения. Основные размеры ленты и дорожек записи показаны на рис. 95.

Большое значение имеют в магнитофонах приводные и управляющие механизмы. Их количество настолько велико, что не позволяет достаточно наглядно описать в столь малой книге. Основная разница механизмов заключается в количестве применяемых электродвигателей.

Студийные магнитофоны обычно имеют три самостоятельных электродвигателя, каждый из которых выполняет определенную функцию. Один — для намотки и быстрого хода вперед; другой — для быстрой перемотки назад и третий — ведущий. Для двух первых функций электродвигатели применяются достаточно редко. У магнитофонов широкого потребления обычно применяют один электродвигатель, различным переключением которого достигается выполнение всех необходимых функций.

Однако магнитофон, построенный по первому способу (с тремя электродвигателями), хотя и дорог и имеет большие размеры и вес,

имеет довольно простую механическую часть и поэтому более надежен. Наоборот, использование в магнитофоне одного электродвигателя усложняет механическую часть, заставляет с большим вниманием относиться к точности изготовления и подсоединения отдельных деталей. Магнитофоны этого вида капризны и ненадежны в эксплуатации, зато имеют меньший вес и размеры. Два электродвигателя используются в магнитофонах очень редко, этот способ наименее выгоден, так как намного дороже магнитофонов с одним электродвигателем и в то же время их механическая часть значительно сложнее магнитофонов с тремя электродвигателями.

Качество записи находится в прямой зависимости от качества изготовления приводного механизма, так как малейшее колебание скорости движения ленты вызывает искажение воспроизведения.

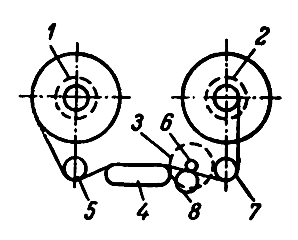


Рис. 96. Примерная схема принципа действия магнитофона с тремя электродвигателями.

1 — двигатель перемотки; *2* — двигатель намотки; *3* — ведущий двигатель; *4* — магнитные головки; *5*, *7* — направляющие ролики; *6* — ведущий вал; *8* — прижимной ролик.

На рис. 96 в качестве примера показан принцип действия магнитофона с тремя электродвигателями. При записывании или переписывании лента сматывается с левой катушки и наматывается на правую. Скорость движения ленты устанавливается ведущим валом. Работа его должна быть точна и хорошо налажена, так как малейшее несовершенство этой детали вызывает искажение всей записи.

Чтобы лента не проскальзывала на ведущем валу, она прижимается прижимным роликом, который покрыт резиной и отшлифован. На ось ведущего вала надет большой маховик, диаметр которого достигает 100 *мм* и более. Маховик должен быть особенно тщательно изготовлен и сбалансирован. Напряжение ленты в магнитофоне с тремя электродвигателями достигается тем, что при записи или воспроизведении левый электродвигатель подключается так, что стремится повернуться в направлении, обратном движению ленты, тем самым натягивая и тормозя ее движение.

Рассмотрим теперь задачи электрических трактов магнитофона. На рис. 97 приведены типовые частотные характеристики его трактов записи и воспроизведения. Предположим, что на усилитель записи поступает сигнал одинаковой амплитуды для всего передаваемого диапазона частот. Усилитель записи при этом должен иметь частотную характеристику, повышающуюся в области высоких частот (рис. 97,*б*), чтобы исправить частотные характеристики следующих этапов записи. На рис. 97,*в* показана частотная характеристика тока записывающей головки. Необходимо стремиться, чтобы этот ток в большей части записываемых частот оставался постоянным. Так как записывающая головка характеризуется индуктивностью, т. е. индуктивное сопротивление возрастает пропорционально частоте согласно уравнению $X_2=2\pi fL$, то последовательно с ней подключается активное сопротивление, которое во много раз увеличивает общее сопротивление и таким образом определяет проходящий ток. Величина этого последовательно включенного сопротивления состав-

ляет около 0,1 *Мом*. Результирующая характеристика полученной записи выглядит как на рис. 97,*г*. Размагничивание ленты вызывает наклон частотной характеристики в области высших частот. Следующие процессы, представленные на рисунке, относятся уже к воспроизведению.

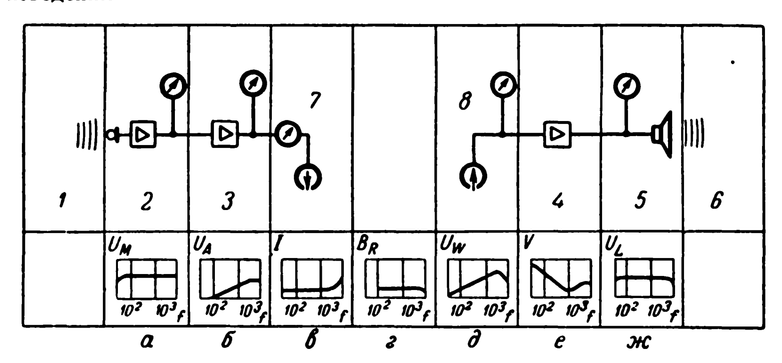


Рис. 97. Частотные характеристики трактов записи и воспроизведения магнитофона.

1 — звуковые волны; *2* — микрофонный усилитель; *3* — усилитель записи; *4* — усилитель воспроизведения; *5* — громкоговоритель; *6* — звуковые волны; *7* — записывающая головка; *8* — воспроизводящая головка.

Напряжения на воспроизводящей головке подчиняются законам индукции

$$E = -n\frac{d\Phi}{dt},$$

где n_1 — число витков обмотки воспроизводящей головки, а выражение $d\Phi/dt$ обозначает изменения магнитного потока во времени. В том случае, если магнитный поток изменяется по синусоидальному закону $\Phi=\Phi_{макс}\sin\omega t$, то ранее приведенное уравнение приобретет следующий вид:

$$E = -n\Phi_{макс}\omega\cos\omega t.$$

Отсюда видно, что индуцированное напряжение воспроизводящей головки зависит от частоты и выражается кривой, крутизна которой равна 6 *дб/окт*. Таким образом, реальная частотная характеристика будет иметь вид, показанный на рис. 97,*д*.

Исходя из этого, усилитель воспроизведения должен иметь характеристику, имеющую вид зеркального отображения (рис. 97,*е*). Результирующая же характеристика, замеренная на выходе усилителя воспроизведения, выравнивается (рис. 97,*ж*).

В том случае, если магнитофон имеет отдельные усилители для записи и воспроизведения, то корректирующие устройства в каждом усилителе присоединены постоянно. Если же используется только один усилитель, как это бывает часто у магнитофонов

массового потребления, то применяются переключающие устройства.

При использовании отдельных головок для записи и воспроизведения необходимо помнить, что зазоры головок должны быть строго перпендикулярны к направлению движения ленты. Всякое отклонение от этого вызывает увеличение просвета между лентой и головкой, что ведет к значительным потерям, особенно в области высоких частот.

В заключение упомянем о четырехдорожечном магнитофоне и о стереофонической записи.

Между четырехдорожечным магнитофоном и двухдорожечным или однодорожечным нет принципиальной разницы, однако к четырехдорожечному магнитофону предъявляются более строгие технические требования: лентопротяжная система и юстировка щелей магнитных головок должны выполняться с большей точностью. Потери высоких частот, вызываемые неплотным прилеганием ленты к поверхности магнитной головки из-за недостаточной гибкости подложки и шероховатости поверхности, имеют здесь вследствие более низкого уровня полезного сигнала относительно большее значение. Следовательно, для четырехдорожечных лент следует применять сверхтонкие подложки с безукоризненно отполированной поверхностью, а магнитный слой не должен иметь никаких неровностей. Размеры четырехдорожечной записи приведены на рис. 95,*а*.

Порядок записи дорожек обычно таков, что записывается прежде первая дорожка *I*, катушка поворачивается и записывается четвертая дорожка (*IV*). Затем усилитель записи переключается с верхней головки на нижнюю и, после поворота катушки записывается третья (*III*) дорожка. После последнего поворота катушки записывается снова нижней головкой *II* дорожка.

При стереофонической записи в эксплуатации находятся две системы головок одновременно: верхней головкой записывается первая дорожка через левый канал, а нижней головкой — третья дорожка через правый канал. После поворота катушек на четвертую дорожку записывается левый, а на вторую — правый канал.

В настоящее время стереофоническая запись и воспроизведение сделали еще больший шаг вперед, но, к сожалению, объем данной брошюры не позволяет рассмотреть все схемные и конструктивные усовершенствования, введенные за последние годы.

Zdenek Paulin
Zazraky zvuku
Knižice technicky vyběr do kapsy, PRACE, 1962

З. Паулик
Чудеса звука, перевод с чешского *М. Р. Жолобовой*
М.—Л., издательство „Энергия", 1965, 80 стр. с илл. (Массовая радиобиблиотека. Вып. 579).
Сводный тематический план 1965 г. „Радиоэлектроника и связь" № 200.

Редактор *Л. П. Борисов* Техн. редактор *Н. А. Бульдяев*

Обложка художника *А. М. Кувшинникова*

Сдано в набор 22/IV 1965 г. Подписано к печати 23/VI 1965 г.
Бумага $84\times108^1/_{32}$ Печ. л. 4,2 Уч.-изд. л. 5,14
Тираж 48 000 экз. Цена 26 коп. Зак. 292

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати.
Шлюзовая наб., 10.

Цена 26 коп.